Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica

TESIS

Evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueve el bienestar en una oficina en base a la Guía de Diseño UL 24480

Para obtener el título profesional en Ingeniería Mecánica Eléctrica

Elaborado por

Ivan Prado Cienfuegos

0009-0001-4802-455X

Asesor

M.Sc. Edgard Guadalupe Goñas

0000-0002-2144-6058

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Prado Cienfuegos [1]
Referencia/Reference Estilo/Style: IEEE (2020)	[1] I. Prado Cienfuegos, "*Evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueve el bienestar en oficinas en base a la Guía de Diseño UL 24480*" [Tesis]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.

Citar/How to cite	(Prado, 2024)
Referencia/Reference Estilo/Style: APA (7ma ed.)	Prado, I. (2024). *Evaluación de la viabilidad técnica del diseño de iluminación que promueve el bienestar en oficinas en base a la Guía de Diseño UL 24480*. [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.

Dedicatoria

A mis padres, quienes siempre me han apoyado en este camino.

Agradecimientos

Agradezco a mi alma máter por haberme impartido los conocimientos necesarios para mi desarrollo profesional y personal.

A mis compañeros de la universidad, profesores y amigos por la motivación y la predisposición a escuchar sobre la investigación desarrollada.

Resumen

El presente trabajo de investigación desarrolla una mejora en el diseño de iluminación interior que promueva la sincronización del ritmo circadiano, el cual influye en el bienestar de los ocupantes. En Perú, a la fecha, la normativa local solo considera parámetros que garanticen un buen rendimiento visual. Esto no garantiza una adecuada iluminación para respaldar la sincronización del ritmo circadiano y, por lo tanto, se compromete negativamente el bienestar de las personas que realizan actividades en edificaciones por periodos prolongados.

La investigación se centra en evaluar la viabilidad técnica del diseño de iluminación que promueva el bienestar de las personas, en base a la Guía de Diseño UL 24480, en el contexto de las normativas locales en Perú. La Guía de Diseño UL 24480 introduce la métrica "estímulo circadiano" con el objetivo de fomentar la sincronización del ritmo circadiano en el diseño de iluminación interior. Sin embargo, el diseño basado en esta métrica presenta desafíos para cumplir con los criterios de la normativa local debido al desconocimiento de tecnologías de iluminación que puedan ser utilizadas y metodologías para el diseño de estos sistemas de iluminación interior.

La investigación busca proporcionar una base sólida para fomentar el diseño de iluminación que promueva el bienestar de las personas mediante el diseño en Dialux de un sistema de iluminación, considerando las regulaciones locales y comprendiendo los posibles cambios en la normativa peruana al considerarse el estímulo circadiano como otro parámetro de diseño. El estudio se llevó a cabo en las oficinas del piso 8 de la Torre Javier Prado ubicado Av. Javier Prado Este 444, San Isidro 15046, departamento de Lima siguiendo las pautas establecidas en la Guía de Diseño UL 24480, que especifica su aplicación en espacios interiores con mayor actividad diurna y exposición a la luz artificial.

Palabras clave: Guía de Diseño UL 24480, ritmo circadiano, estímulo circadiano, Dialux

Abstract

The present research work develops an improvement in the interior lighting design aimed at promoting the synchronization of the circadian rhythm, which influences the well-being of occupants. In Peru, to date, local regulations only consider parameters that guarantee good visual performance. This does not ensure adequate lighting to support circadian rhythm synchronization and, therefore, negatively compromises the well-being of individuals engaging in activities within buildings for prolonged periods.

The research focuses on evaluating the technical feasibility of lighting design that promotes the well-being of individuals, based on UL 24480 Design Guide, within the context of local regulations in Peru. The UL 24480 Design Guide introduces the "circadian stimulus" metric with the aim of fostering circadian rhythm synchronization in interior lighting design. However, designing based on this metric presents challenges to meet local regulatory criteria due to the lack of knowledge of lighting technologies that can be used and methodologies for the design of these interior lighting systems.

The research seeks to provide a solid foundation for promoting lighting design that promotes the well-being of individuals by designing a lighting system in Dialux, considering local regulations and understanding potential changes in Peruvian regulations when considering circadian stimulus as another design parameter. The study was conducted in the offices on the 8th floor of the Javier Prado Tower located at Av. Javier Prado Este 444, San Isidro 15046, Lima department, following the guidelines established in the UL 24480 Design Guide, which specifies its application in indoor spaces with higher daytime activity and exposure to artificial light.

Keywords: Design Guideline UL 24480, circadian rhythm, circadian stimulus, Dialux.

Tabla de contenido

Resumen ..... **V**

Abstract ..... **VI**

Prólogo ..... **XIV**

Abreviaturas y siglas ..... **XVI**

Capítulo I Introducción **1**

1.1 Generalidades 1

1.2 Descripción del problema de investigación 2

1.2.1 Planteamiento de la realidad problemática 2

1.2.2 Formulación del problema 4

1.3 Objetivo del estudio 4

1.3.1 Objetivo general 4

1.3.2 Objetivos específicos 4

1.4 Antecedentes investigativos 4

Capítulo II Marco teórico **7**

2.1 Conceptos generales de la luz 7

2.1.1 Luz natural 7

2.1.2 Luz artificial 7

2.1.3 Espectro electromagnético 7

2.2 Percepción de luz por el ojo humano 10

2.2.1 Fotorreceptores del ojo 11

2.3 Clasificación de luminarias interiores 13

2.3.1 Según el tipo de tecnología 13

2.3.2 Según la emisión de flujo luminoso 17

2.4 Parámetros de diseño de iluminación interior 19
2.4.1 Flujo luminoso 19
2.4.2 Intensidad luminosa 20
2.4.3 Iluminancia 20
2.4.4 Luminancia 21
2.4.5 Uniformidad de iluminación (U_o) 21
2.4.6 Temperatura de color 21
2.4.7 Índice de reproducción cromática 22
2.4.8 Índice de deslumbramiento (UGR) 23
2.5 Iluminación circadiana 23
2.5.1 Luz circadiana 23
2.5.2 Estímulo circadiano 24
2.5.3 Relación entre CL_A y CS 25
2.5.4 Consideraciones de diseño de iluminación circadiana 25
2.5.5 Calculadora de estímulo circadiano 28
2.6 Normativa local y estándares internacionales 29
2.6.1 Norma Básica de Ergonomía y de Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico 30
2.6.2 Norma Técnica del RNE EM.010 30
2.6.3 Norma UNE-EN 12464-1 31
2.6.4 Guía de Diseño UL 24480 33
Capitulo III Hipótesis y operacionalización de variables 34
3.1 Hipótesis general 34

3.2 Hipótesis específicas 34

3.3 Operacionalización de variables 35

Capítulo IV Metodología de la investigación 36

4.1 Tipo de investigación 36

4.2 Diseño de la investigación 36

4.3 Nivel de la investigación 37

4.4 Unidad de análisis 37

4.5 Instrumentos de recolección de datos 37

Capítulo V Desarrollo de la tesis 38

5.1 Evaluación del sistema de iluminación interior del piso 8 de la Torre Javier Prado 38

5.1.1 Ubicación geográfica 38

5.1.2 Estación de trabajo 39

5.1.3 Escritorio de trabajo 39

5.1.4 Disposición y cantidad de trabajadores en la oficina abierta 40

5.1.5 Horario de trabajo 41

5.1.6 Luminarias del sistema de iluminación actual 41

5.2 Consideraciones generales de diseño 45

5.2.1 Arquitectura de la oficina 45

5.2.2 Alcance 45

5.2.3 Exclusiones 45

5.2.4 Horario de diseño 46

5.2.5 Reflectancias 46

5.2.6 Áreas de tarea visual 46

5.3 Diseño de iluminación circadiana 47

5.3.1 Criterio de diseño de iluminación circadiana 48

5.3.2 Luminarias 48

5.3.3 Escenarios de iluminación 50

5.3.4 Metodología para el diseño 53

Capítulo VI Análisis y discusión de resultados 60

6.1 Análisis de los resultados 60

6.1.1 Estímulo circadiano actual en oficinas del piso 8 60

6.1.2 Análisis de los escenarios de iluminación 61

6.1.3 Compatibilidad del diseño de iluminación con la normativa local 64

6.1.4 Costo de las luminarias y consumo de energía 66

6.1.5 Puntos de mejora en la normativa local 68

6.2 Contrastación de la hipótesis 69

Conclusiones 71

Recomendaciones 73

Referencias 74

ANEXOS 77

Lista de Tablas

Tabla 1 Clasificación CIE de luminarias interiores según flujo luminoso 17

Tabla 2 Clasificación de luminarias por temperatura de color 22

Tabla 3 Ejemplo de criterio de diseño de estímulo circadiano 26

Tabla 4 Parámetros de iluminación requeridos en la Norma Básica de Ergonomía 30

Tabla 5 Parámetros de iluminación requeridos en la Norma Técnica EM.010 del RNE ..31

Tabla 6 Parámetros de iluminación en oficinas según la UNE-EN-12464-1.....32

Tabla 7 Modificadores de contexto para aumentar la iluminancia mantenida 32

Tabla 8 Total de personas en la oficina 40

Tabla 9 Resumen de características de luminarias de la oficina.....41

Tabla 10 Características del luxómetro digital usado 42

Tabla 11 Estímulo circadiano percibido en la oficina 44

Tabla 12 Factores de reflexión en superficies.....46

Tabla 13 Criterio de diseño de iluminación circadiana 48

Tabla 14 Características principales de la luminaria 49

Tabla 15 Resultados de simulación de estaciones de trabajo del escenario 1.....54

Tabla 16 Resultados de estímulo circadiano (CS) del escenario 1 55

Tabla 17 Resultados de simulación de estaciones de trabajo del escenario 2.....56

Tabla 18 Resultados de estímulo circadiano (CS) del escenario 2 57

Tabla 19 Resultados de simulación de estaciones de trabajo del escenario 3.....57

Tabla 20 Resultados de estímulo circadiano (CS) del escenario 3 58

Tabla 21 Resumen de resultados 65

Tabla 22 Porcentaje de cumplimiento de la Guía de diseño UL 24480 con la NBE 65

Tabla 23 Porcentaje de cumplimiento de la Guía de diseño UL 24480 con la Norma Técnica EM.010.....65

Tabla 24 Costo referencial de las luminarias 66

Tabla 25 Consumo de los sistemas de iluminación convencional.....67

Tabla 26 Consumo del sistema de iluminación circadiana.....67

Lista de Figuras

Figura 1 Consecuencias de la disrupción circadiana 2

Figura 2 Niveles de iluminancia natural y artificial 3

Figura 3 Espectro visible por el ojo humano 8

Figura 4 Luxómetro 9

Figura 5 Espectrofotómetro 10

Figura 6 Partes del ojo humano 11

Figura 7 Los 5 fotorreceptores del ojo 11

Figura 8 Sensibilidad de fotorreceptores de la vista 13

Figura 9 Luminaria incandescente 14

Figura 10 Luminaria fluorescente 14

Figura 11 Luminaria LED 15

Figura 12 Solución Vivid tune de Cooper Lighting 16

Figura 13 Sistema de control de iluminación 17

Figura 14 Luminarias según la cantidad de flujo luminoso 18

Figura 15 Flujo luminoso 19

Figura 16 Intensidad de flujo luminoso 20

Figura 17 Parámetro de Iluminancia 21

Figura 18 Manzana iluminada en diferentes IRC 22

Figura 19 Relación entre luz circadiana y el estímulo circadiano 25

Figura 20 Luminaria incandescente de 2700 K 26

Figura 21 Luminaria fluorescente de 4000 K 27

Figura 22 Luminaria LED de 5500 K 27

Figura 23 Medición de iluminancia vertical 28

Figura 24 Selección de temperatura de color y tipo de luminaria 28

Figura 25 Espectro de luminaria seleccionada (LED 5000 K) 29

Figura 26 Estímulo circadiano calculado 29

Figura 27 Ubicación de la oficina 38

Figura 28 Ubicaciones de las estaciones de trabajo.....39

Figura 29 Escritorios de trabajo.....40

Figura 30 Montaje de luxómetro a soporte para mediciones 42

Figura 31 Ubicaciones para la toma de mediciones 43

Figura 32 Luminaria tipo LED de CCT 4000 K 43

Figura 33 Interfaz de la calculadora de estímulo circadiano.....44

Figura 34 Arquitectura de la oficina en Dialux 45

Figura 35 Estación de trabajo de 8 personas modelo Dialux.....47

Figura 36 Estación de trabajo de 8 personas vista de planta 47

Figura 37 Luminaria LED Cooper Lighting 49

Figura 38 Fotometría de la luminaria.....49

Figura 39 Distribución espectral de las luminarias 50

Figura 40 Escenario 1, 6500 K, 100% capacidad.....51

Figura 41 Escenario 2, 4000 K, 70% capacidad.....51

Figura 42 Escenario 3, 2700 K, 50% capacidad.....52

Figura 43 Diagrama de flujo para el desarrollo del diseño iluminación 53

Figura 44 Estimulo circadiano actual en la oficina.....60

Figura 45 Iluminancia vertical (E_v) a 1.1 m sobre el nivel del piso 61

Figura 46 Estimulo circadiano en los escritorios de trabajo.....61

Figura 47 Variación de la iluminancia promedio en los 3 escenarios.....62

Figura 48 Variación de la uniformidad en los 3 escenarios.....63

Figura 49 Deslumbramiento en los 3 escenarios.....64

Figura 50 Consumo de iluminación convencional e iluminación que promueva el bienestar.....68

Prólogo

La presente tesis tiene como objetivo la mejora en el diseño de iluminación en oficinas mediante la evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueva el bienestar de las personas en oficinas en base a la Guía de Diseño UL 24480 y la normativa local.

El CAPITULO I muestra una visión global del tema abordado, explorando la problemática presente, estableciendo los objetivos a lograr y presentando los principios y el motivo que se tuvo en cuenta durante la creación de este proyecto de investigación.

El CAPITULO II reúne todos los conceptos que son necesarios para tener una mejor comprensión de la realidad problemática respecto al diseño de iluminación actual en interiores. Se definen los conceptos fundamentales respecto a la luz, tecnologías de iluminación, enfoques de iluminación y normativas o estándares de iluminación referente a espacios interiores.

El CAPÍTULO III presenta la hipótesis general del proyecto, así como las hipótesis específicas que serán evaluadas durante la investigación. Se incluye también la definición de operacionalización de las variables independientes y dependientes, con el propósito de establecer un fundamento sólido para la posterior evaluación y análisis.

El CAPÍTULO IV describe el tipo, diseño de la investigación, unidad de análisis seleccionada e instrumentos de recolección de datos para el estudio. Además, se presenta la matriz de consistencia donde se interrelacionan los problemas, objetivos e hipótesis de la investigación tanto generales como específicas.

El CAPÍTULO V presenta el desarrollo de la tesis, donde se determinará si la iluminación recibida por los trabajadores es la suficiente en base a la métrica del estímulo circadiano (CS) de la Guía de Diseño UL 24480. Posterior a ello se propondrá un diseño de iluminación con tres diferentes escenarios que cumplan técnicamente tanto con la normativa local y lo indicado en la Guía de Diseño UL 24880 en la medida de lo posible.

El CAPÍTULO VI se dedica al análisis exhaustivo de los resultados obtenidos en base a las mediciones realizadas en la oficina del piso 8 de la Torre Javier Prado, y la comparación de los escenarios de iluminación planteados en el diseño para la evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueve el bienestar en oficinas, en base a la Guía de Diseño UL 24480 y la normativa local.

Abreviaturas y siglas

CCT: Temperatura de color correlacionada.

CIE: Comisión Internacional de Iluminación.

CL_A: Luz circadiana efectiva.

E_m: Iluminancia mantenida promedio.

E_{min}: Es la iluminancia mínima en una superficie.

E_v: Iluminancia vertical.

LRC: Lighting Research Center.

Lux: Unidad de medida de la iluminancia.

IpRGS: Células ganglionares de la retina intrínsecamente fotosensibles.

IRC: Índice de Reproducción Cromática.

NBE: En la presente tesis se usa la expresión NBE como abreviación de la “Norma Básica de Ergonomía y Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico”.

RNE: Reglamento Nacional de edificaciones.

UL 24480: Guía de diseño para promover la sincronización circadiana en personas activas de día.

Ø: Flujo luminoso, se expresa en lumen.

Estimulo circadiano (CS): Es una medida cuantitativa de cómo la luz influye en la regulación del ritmo circadiano.

Iluminancia (E): Es la medida de la cantidad de luz o flujo luminoso (ϕ) que llega a una superficie, se expresa en lux.

Iluminación circadiana: Es el enfoque de iluminación que promueve la sincronización del ritmo circadiano.

Intensidad luminosa (I): Es la medida de la cantidad de luz emitida por segundo en una dirección específica, se expresa en candelas (cd).

Luminancia: Es la cantidad de luz emitida por unidad de área proyectada de esa superficie en una dirección específica, se expresa en cd/m^2.

Ritmo circadiano: Ciclo biológico que tiene una duración aproximada de 24 horas.

Sincronización del ritmo circadiano: Sincronización del ciclo biológico del cuerpo humano a través del ciclo natural de luz y oscuridad de 24 horas.

Uniformidad (U_o): Es la relación entre la iluminancia mínima y la iluminancia promedio de una superficie.

Capítulo I Introducción

La luz es el principal sincronizador del reloj biológico humano, también conocido como el ritmo circadiano, y se utiliza para proporcionar iluminación en diferentes aplicaciones, tales como la industria, hospitales, universidades y domicilios, mediante el uso de diversas tecnologías de iluminación.

Según [1, p. 28], el ritmo circadiano, también conocido como ritmo biológico, es un ciclo endógeno de aproximadamente 24 horas que regula una amplia gama de procesos fisiológicos, bioquímicos y conductuales en los organismos vivos, incluyendo los seres humanos. Este ritmo intrínseco se sincroniza principalmente con las variaciones diurnas y nocturnas del entorno, y cumple una función esencial en la regulación de funciones corporales vitales, como el ciclo sueño-vigilia, la temperatura corporal, la liberación de hormonas y la digestión.

La iluminación, que tiene en cuenta la sincronización del ritmo circadiano para promover el bienestar de las personas, se denomina iluminación circadiana.

1.1 Generalidades

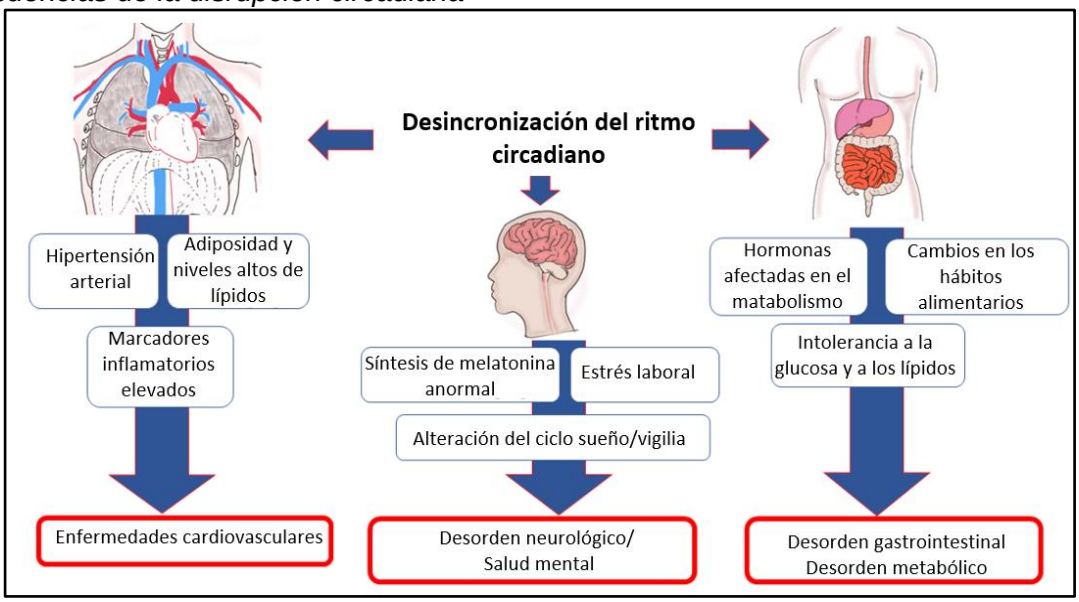
Actualmente, la iluminación en interiores, como en oficinas, escuelas, entre otros, está diseñada para proveer un buen rendimiento visual durante el desarrollo de actividades en estos espacios.

Sin embargo, esto no considera el bienestar de las personas, el cual está estrechamente relacionado con una buena sincronización del ciclo circadiano, que a su vez es estimulado por la iluminación, la cual puede ser natural o artificial.

De acuerdo con el texto citado en [2, p. 1], la disrupción del ritmo circadiano conduce a un riesgo moderadamente mayor a problemas gastrointestinales, trastornos cardiovasculares, desordenes metabólicos, etc.

Figura 1

Consecuencias de la disrupción circadiana



Nota: Adaptado de la referencia [2, p. 3].

Debido a lo expuesto anteriormente, es necesario un diseño de iluminación que tenga en cuenta tanto un buen rendimiento visual como el bienestar del usuario.

1.2 Descripción del problema de investigación

1.2.1 Planteamiento de la realidad problemática

Las prácticas actuales de iluminación no garantizan la iluminación adecuada durante el día para promover el bienestar de las personas, debido a que la exposición que tenemos por medio de la luz artificial durante el día es demasiado baja y está influye negativamente en el ritmo circadiano de las personas que los ocupan, según el texto citado en [1, p. 22].

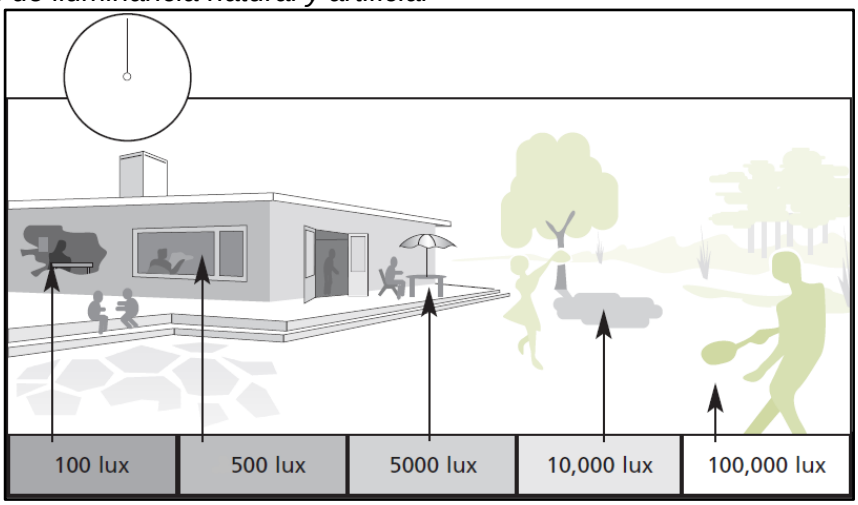
La Norma Técnica EM.010[1] de Instalaciones Eléctricas Interiores del Reglamento Nacional de Edificaciones y la Norma Básica de Ergonomía y Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico[2] indican valores de iluminancia requeridos en instalaciones interiores, como oficinas, aulas, estaciones de trabajo, los cuales varían entre 300 lx a 500 lux. Por otro lado, la luz natural puede alcanzar valores de iluminancia de 100 000 lux

[1] Aprobado mediante la Resolución Ministerial N° 083-2019-Vivienda.
[2] Aprobado por la Resolución Ministerial N° 375-2008-TR.

según [3, p. 6] . Es importante reconocer esta diferencia, ya que la luz influye en el ritmo circadiano como se mencionó en el párrafo anterior.

Figura 2

Niveles de iluminancia natural y artificial



Nota: Tomado la referencia [3, p. 4].

La Underwriters Laboratories emitió la Guía de Diseño UL 24480 en diciembre del año 2019, donde establece una métrica o medida llamada estímulo circadiano (CS), con el fin de promover la sincronización del ritmo circadiano en el diseño de iluminación, es decir promover el bienestar en el diseño mediante el uso de esta nueva medida.

La Guía de Diseño UL 24480 solo se limita al diseño en base a la medida del estímulo circadiano, más no contempla en su diseño parámetros como la iluminancia, deslumbramiento, uniformidad, los cuales están indicados en la normativa local para garantizar un buen rendimiento visual.

La incorporación de la métrica estímulo circadiano en los diseños de iluminación puede presentar desafíos para cumplir con los criterios de la normativa local. El desconocimiento de las tecnologías de iluminación disponibles, una metodología de diseño, la integración y compatibilidad con la normativa peruana pueden complicar la viabilidad de estos diseños en la práctica.

Así, a través de la evaluación de un diseño de iluminación, se plantea si es posible que exista la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueve el bienestar, en base a la Guía de Diseño UL 24480.

1.2.2 Formulación del problema

1.2.2.1 Problema general

¿Como se puede mejorar el diseño iluminación en oficinas para promover el bienestar en base a la Guía de Diseño UL 24480?

1.2.2.2 Problemas específicos

a) ¿Es posible diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la normativa local en oficinas?

b) ¿Es posible diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la Guía de diseño UL 24480 en oficinas?

1.3 Objetivo del estudio

1.3.1 Objetivo general

Mejorar el diseño de iluminación en oficinas mediante el diseño y evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación para promover el bienestar en base a la Guía de Diseño UL 24480.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la normativa local en oficinas.
- Diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la Guía de Diseño UL 24480 en oficinas.

1.4 Antecedentes investigativos

Esteban Andrés Beltrán Ramírez y Rubén Darío Ortiz Anaya (2023) en su tesis de pregrado [5] “Diseño de iluminación de un piso de un hospital aplicando el estándar WELL”, se realiza el diseño de iluminación circadiana en base al estándar WELL y su normativa local (RETILAP) para las áreas de enfermería y habitación bipersonal en un hospital.

La tesis presenta una evaluación técnico-económica donde se concluye que el diseño de iluminación circadiana en base al estándar WELL[3] y su normativa es factible técnicamente; sin embargo, el diseño el sistema de iluminación resulta ser más costoso por la consideración de luminarias con características especiales como luminarias pueden cambiar de intensidad (dimerizables) y que puedan modificar su temperatura de color (tunable white), de acuerdo con el horario del día con el fin de cumplir una adecuada iluminación circadiana.

Holman Enrique Cubides Garzón (2022) en su tesis de maestría [4] “Diseño de una herramienta de cálculo de iluminación basada en el estímulo de los ritmos circadianos”, desarrolla una herramienta gráfica de cálculo que permite la interacción con las variables de iluminancia vertical (E_v) y el espectro de luz visible con el fin de calcular el estímulo circadiano (CS) y su aplicación a un diseño con luces LED de 4 canales (rojo, verde, azul, blanco). En su caso de estudio del diseño de iluminación, se logró cumplir con la Guía de Diseño UL24480 gracias al ajuste con iluminación dinámica, la cual modifica la emisión de luz y la temperatura de color de la luminaria.

El articulo precisa que es de suma importancia que la normativa logre incorporar conceptos como el estímulo circadiano, variabilidad de la iluminancia.

María Magdalena Granifo Correa (2021) en su tesis [7] "Intervención lumínica experimental que favorezca la sincronización del ciclo circadiano en el ambiente de aprendizaje" realizó un diseño experimental en el que se crearon cuatro escenas lumínicas diferenciadas por la intensidad lumínica y la temperatura de color, la cual varió desde tonos cálidos hasta fríos. En estas escenas, se evaluó el rendimiento, la concentración, la memoria y el estado de alerta mediante tareas típicas en un grupo de niños de 4 años en un horario matutino (entre las 8:30 am y las 12:30 pm). Las escenas se recrearon utilizando una luminaria de 7 canales que tiene la capacidad de modular su intensidad y temperatura

[3] Desarrollado por el International WELL Building Institute (IWBI) con el objetivo de promover entornos construidos que mejoren la salud y el bienestar físico, mental y emocional de los ocupantes.

de color. Según los resultados, se concluye que el rendimiento, la concentración y la memoria varían según el estímulo lumínico percibido.

Cinthia Garrrido y Maria Beatriz Piderit Moreno (2020) en su artículo de investigación [6] “Factores de diseño de la iluminación que intervienen en el estímulo circadiano en oficinas”, se realiza el diseño de iluminación circadiana en base a la métrica de estímulo circadiano (CS).

La investigación realizó un diagnóstico de la situación en las oficinas de la Universidad Del Bío-Bío en Chile, Concepción, Chile, y posterior a ello una propuesta de para la estimulación circadiana considerando los parámetros como: la temperatura de color e intensidad de la fuente de luz, horario de trabajo, así como también factores arquitectónicos como el coeficiente de reflexión de las superficies.

El artículo concluye que los proyectos de iluminación deben ser diseñados tomando en consideración la totalidad de nuestro sistema visual, tanto para cumplir con tareas visuales como para ayudar al rendimiento, el estado de ánimo y bienestar de las personas.

Capítulo II Marco teórico

En este capítulo se describe los conceptos generales de la luz, percepción de la luz por el ojo humano, tecnologías de iluminación, parámetros de diseño de iluminación interior, iluminación circadiana y normativa de iluminación referente a espacios interiores.

2.1 Conceptos generales de la luz

2.1.1 Luz natural

Según el texto citado en [8, p. 10], la luz natural se refiere a la radiación electromagnética emitida por el sol y que llega a la tierra, la cual cambia al atravesar la atmósfera. Es una fuente de energía esencial para la vida en nuestro planeta, ya que proporciona la iluminación diurna necesaria para diversas actividades y procesos biológicos.

2.1.2 Luz artificial

La luz artificial se refiere a la iluminación generada por fuentes creadas por el hombre. A diferencia de la luz natural, que proviene del sol la luz artificial se genera mediante tecnologías diseñadas para satisfacer las necesidades de iluminación en diferentes entornos.

Las fuentes que producen luz artificial incluyen lámparas incandescentes, lámparas fluorescentes, lámparas LED, lámparas de halógeno, luces de neón, lámparas de vapor sodio de alta presión y baja presión, y lámparas de vapor de mercurio. Cada una de estas fuentes utiliza diferentes tecnologías y mecanismos para generar luz artificial.

2.1.3 Espectro electromagnético

De acuerdo con el texto citado en [9, p. 2] , el espectro electromagnético se refiere a la totalidad de las radiaciones electromagnéticas que abarcan todas las longitudes de onda y se organizan según su frecuencia. Estas radiaciones se identifican y clasifican en diferentes franjas, y su denominación suele estar relacionada con las aplicaciones tecnológicas con las que comúnmente se asocian.

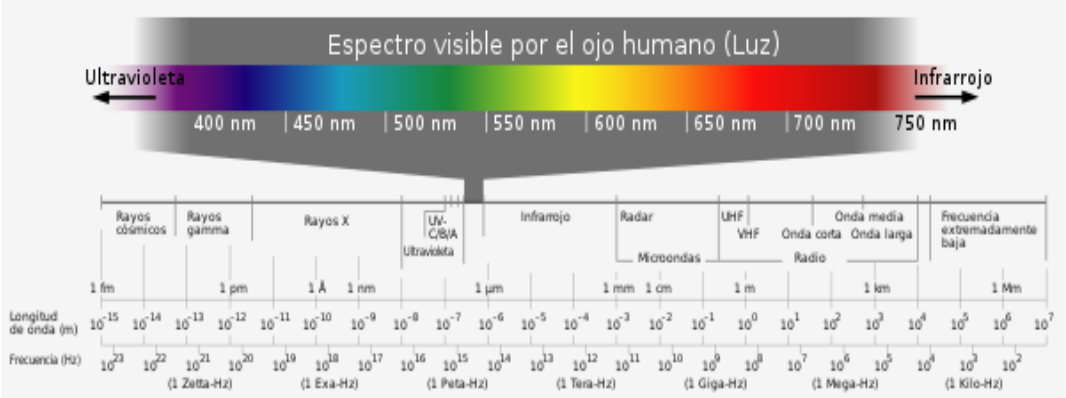
2.1.3.1 Luz visible

La luz visible, también llamado espectro visible, es una forma de radiación electromagnética que puede ser detectada por el ojo humano. Se clasifica como parte del espectro electromagnético y se conoce específicamente como luz visible como se explica en [10, p. 15].

En comparación con las otras regiones espectrales, la porción del espectro visible que el ser humano puede percibir es muy pequeña. Esta región, abarca longitudes de onda que comprende el rango desde 380 nm hasta 780 nm, tal como se aprecia en la Figura 3. Cada longitud de onda dentro de este rango es percibida por el ojo humano como un color diferente. Por lo tanto, al descomponer la luz blanca en todas sus longitudes de onda mediante prismas o mediante la refracción en un arco iris, el ojo humano es capaz de ver todos los colores presentes.

Figura 3

Espectro visible por el ojo humano



Nota: Imagen adaptada de [10, p. 20]

2.1.3.2 Instrumentos de medición de la luz

Los instrumentos de medición de la luz son dispositivos especializados diseñados para cuantificar diversos aspectos relacionados con la iluminación. Estos instrumentos se utilizan en diferentes campos, como el diseño de iluminación, la fotografía, la investigación científica y la ingeniería, para asegurar una iluminación adecuada y cumplir con estándares y requisitos específicos. Algunos de los instrumentos de medición de luz más comunes son el luxómetro, colorímetro y espectrofotómetro los cuales se detallarán a continuación.

2.1.3.3 Luxómetro

De acuerdo al texto citado en [11], el luxómetro es un dispositivo que proporciona una medición rápida y sencilla de la iluminancia en un lugar específico. Se distingue por su sensor que captura información sobre la iluminación en ese entorno.

La unidad de medida estándar para el luxómetro es el lux (lx), que se emplea para cuantificar la cantidad de luz incidente en una superficie. Un lux equivale a un lumen por metro cuadrado.

Figura 4

Luxómetro

Nota: Imagen tomada de la referencia [11].

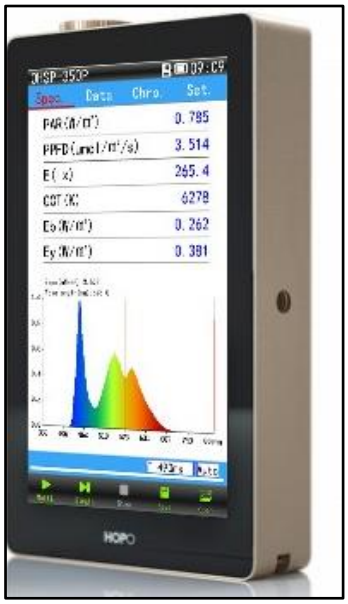
2.1.3.4 Espectrofotómetro

El espectrofotómetro es un instrumento ampliamente utilizado en la investigación científica y en diversas disciplinas para medir la absorbancia[4], transmitancia[5] y reflectancia[6] de sustancias en función de la longitud de onda de la luz. Este dispositivo permite analizar el comportamiento de las sustancias en diferentes regiones del espectro electromagnético y obtener información cuantitativa sobre sus propiedades como la distribución espectral de la luz dentro del rango de luz visible.

[4] Capacidad de una sustancia de absorber energía lumínica al ser expuesta a la luz.
[5] Es una propiedad óptica que describe la cantidad de luz que es capaz de atravesar una superficie o material.
[6] Es la fracción de luz incidente que es reflejada por una superficie.

Figura 5

Espectrofotómetro



Nota: Imagen tomada de la referencia [12]

2.2 Percepción de luz por el ojo humano

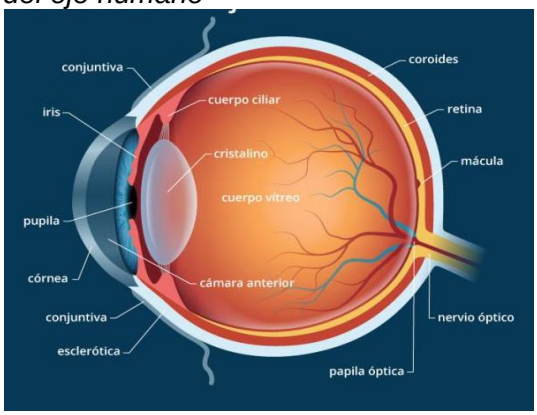
De acuerdo con el texto citado en [13], el ojo es una estructura compleja que recoge la radiación electromagnética del entorno, la transforma en señales eléctricas a través de un proceso conocido como fototransducción y transmite la información visual al cerebro a través del nervio óptico.

Las partes principales en este proceso son:

- La córnea y cristalino se encargan refractar la luz entrante para enfocarla en la retina.
- La pupila y el iris trabajan juntos para regular la cantidad de luz que entra en el ojo. La pupila, el agujero en el centro del iris, se contrae o dilata para ajustar la cantidad de luz que pasa a través del cristalino.
- La retina es la capa interna y relativamente pequeña del ojo donde ocurre la fototransducción.

Figura 6

Partes del ojo humano



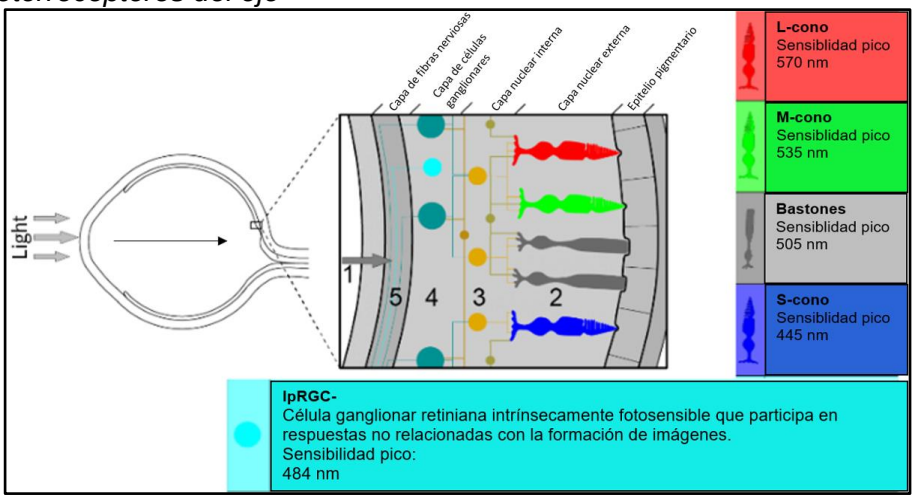
Nota: Imagen tomado de la referencia [14].

2.2.1 Fotorreceptores del ojo

Los fotorreceptores del ojo son células especializadas ubicadas en la retina. Estas células capturan la luz y la convierten en señales eléctricas que el cerebro interpreta como imágenes visuales.

Figura 7

Los 5 fotorreceptores del ojo



Nota: Adaptado de la referencia [13].

2.2.1.1 Conos

Los conos son responsables de la visión diurna y la percepción de colores. Hay tres tipos de conos que son sensibles a diferentes longitudes de onda de luz, lo que permite la visión a todo color. Estos tres tipos de conos se conocen comúnmente como conos sensibles a cortas, medias y largas longitudes de onda, lo que les permite percibir los

colores azul, verde y rojo respectivamente. En condiciones de iluminación suficientemente alta, como en la visión fotópica[7], los conos son los principales contribuyentes a la respuesta visual, lo que permite una visión nítida y la capacidad de percibir una gama completa de colores [3, p. 25].

2.2.1.2 Bastones

Los bastones son más sensibles a niveles de iluminación tenue y son responsables de la visión escotópica[8], que es la capacidad de ver en condiciones de baja luminosidad o en la oscuridad [3, p. 25].

2.2.1.3 IpRGCs

Son células ganglionares de la retina que tienen la capacidad intrínseca de responder a la luz. Las IpRGCs envían señales de luz-oscuridad al núcleo supraquiasmático (SCN), que es el reloj biológico maestro del sistema circadiano. Estas células son parte del sistema no visual de la retina y están involucradas en funciones no relacionadas con la formación de imágenes visuales, como el reflejo pupilar a la luz, la coordinación de movimientos de los ojos, y las respuestas del sistema circadiano [13].

2.2.1.4 Sensibilidad espectral de los fotorreceptoras

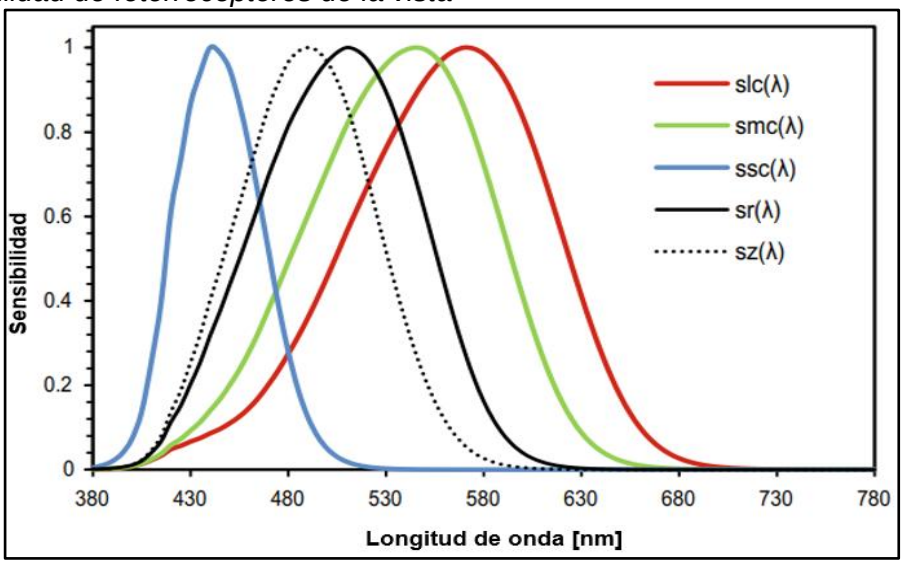
Cada fotorreceptor posee una sensibilidad a las diferentes longitudes de onda dentro del espectro de luz visible. La Figura 8 muestra las diferentes curvas de sensibilidad de los 5 fotorreceptores de la vista.

[7] Es la capacidad del sistema visual para percibir la luz en condiciones de alta luminosidad.

[8] Es la capacidad del sistema visual para percibir la luz en condiciones de baja luminosidad, como durante la noche

Figura 8

Sensibilidad de fotorreceptores de la vista



Nota: Adaptado de la referencia [8, p. 84]

2.3 Clasificación de luminarias interiores

2.3.1 Según el tipo de tecnología

2.3.1.1 Luminarias incandescentes

Las lámparas incandescentes emplean un filamento de tungsteno alojado en un globo de vidrio, ya sea en un ambiente de vacío o en presencia de un gas inerte para evitar la evaporación del tungsteno y reducir el oscurecimiento del globo.

Cuando se aplica corriente eléctrica al filamento metálico de una lámpara incandescente, se genera un aumento de temperatura de hasta 2500 ºC (4500 ºF). A esta elevada temperatura, los electrones que circulan por el tungsteno comienzan a emitir fotones de luz blanca visible, lo que da lugar al fenómeno físico conocido como incandescencia [15, p. 18].

Figura 9

Luminaria incandescente

Nota: Manual de iluminación interior [15, p. 19]

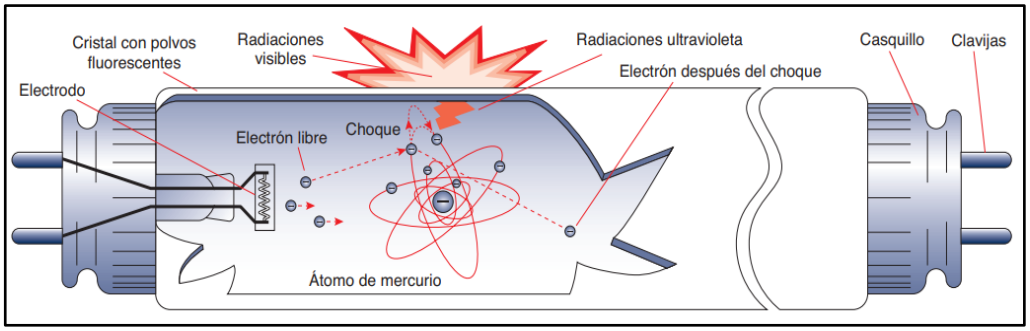
2.3.1.2 Luminarias fluorescentes

Las lámparas fluorescentes son dispositivos de iluminación que funcionan mediante la generación de una descarga eléctrica en una atmósfera de vapor de mercurio a baja presión y un gas inerte.

La principal fuente de luz en estas lámparas se basa en el fenómeno conocido como fluorescencia. La fluorescencia es una propiedad que se encuentra en ciertas sustancias y que les permite transformar las radiaciones no visibles, como las radiaciones ultravioletas generadas por la luminiscencia, en radiaciones visibles [16, p. 183].

Figura 10

Luminaria fluorescente



Nota: Imagen de la referencia [16, p. 183]

2.3.1.3 Luminarias LED

Una luminaria LED es un dispositivo que contiene uno o varios diodos emisores de luz (LED) y se utiliza para proporcionar iluminación en diversos entornos. Consiste en una

carcasa que protege los componentes electrónicos, incluidos los LED, el controlador los disipadores de calor [16, p. 193].

Figura 11

Luminaria LED

Nota: Imagen de la referencia [17, p. 79]

Actualmente esta tecnología es la que lidera el mercado por su versatilidad en las diferentes aplicaciones de iluminación.

a) Variación de temperatura de color

Las luminarias, que poseen la característica de poder ajustar su temperatura de color, son comercialmente conocidas como "tunable white," permiten ajustar la temperatura de color de la luz blanca desde tónicos cálidos hasta neutros y fríos, según las necesidades específicas en un momento dado. Estas luces pueden ser útiles en entornos donde se busca crear ciertos ambientes para mejorar la concentración o adaptarse a diferentes actividades a lo largo del día.

El ajuste de temperatura de color se realizar mediante un dispositivo llamado dimmer el cual regula la temperatura de color según una señal de voltaje de 0-10 V [18].

b) Variación de Intensidad

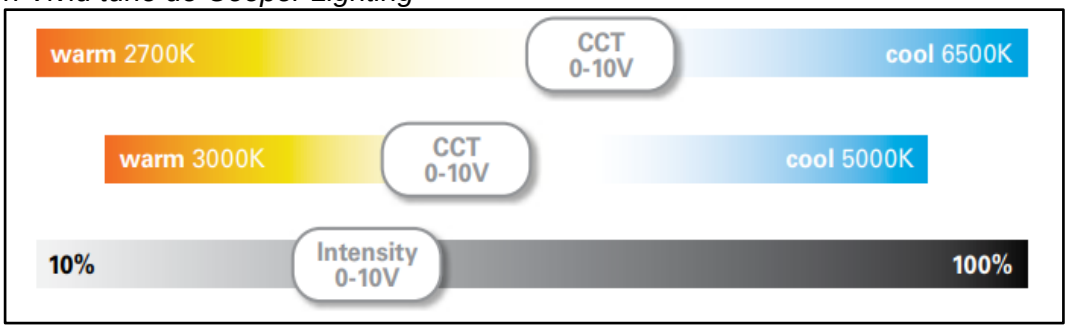
Esta variación se obtiene a partir del “dimmer” que puede regular la intensidad de la luminaria mediante una señal de volteje de 0-10 V según lo citado en [18].

Actualmente existen diferentes marcas de luminarias que ofrecen las características mencionadas, entre ellas se encuentran:

- Cooper Lighting
- Ledvance
- Erco
- USAI Lighting

Figura 12

Solución Vivid tune de Cooper Lighting

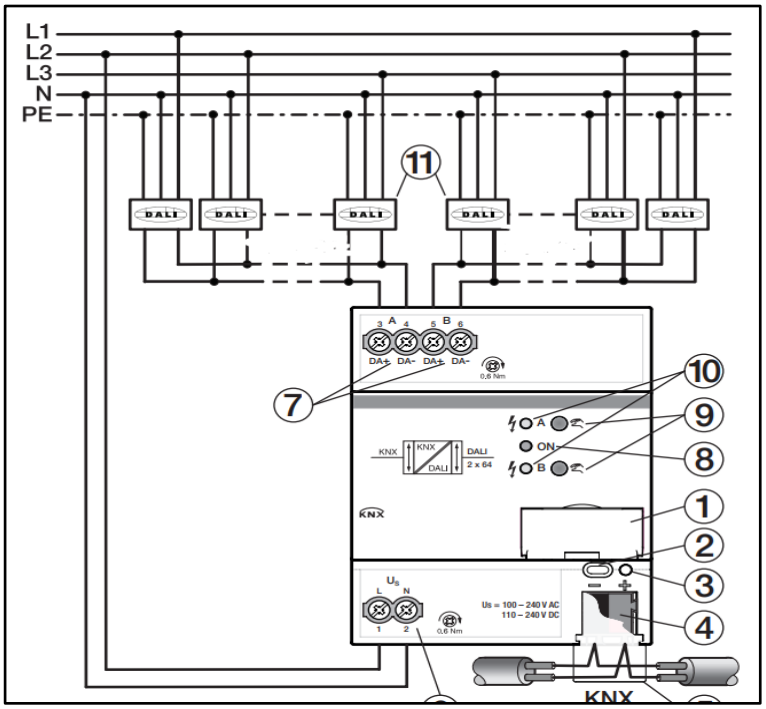


Nota: Imagen adaptada de la referencia [18].

Adicionalmente para el control de los dimmers es necesario tener un controlador general que permita variar la iluminación de los dimmers según la programación de este como se muestra en la siguiente figura.

Figura 13

Sistema de control de iluminación



Nota: Imagen adaptada de la referencia [19].

2.3.2 Según la emisión de flujo luminoso

Según [3, p. 106] la CIE (Comisión Internacional de Iluminación) clasifica las luminarias utilizadas para la iluminación general en interiores en función de la proporción del flujo luminoso total que se emite por encima y por debajo de un plano horizontal que atraviesa la luminaria.

Tabla 1

Clasificación CIE de luminarias interiores según flujo luminoso

Clase de luminaria	Porcentaje de flujo emitido sobre la horizontal	Porcentaje de flujo emitido bajo la horizontal
Directa	0-10	90-100
Semi directa	10-40	60-90
Difusa	40-60	40-60
Semi indirecta	60-90	10-40
Indirecta	90-100	0-10

Nota: Tabla adaptada de [3, p. 106]

Figura 14

Luminarias según la cantidad de flujo luminoso

Nota: Imagen adaptada de la referencia [20]

2.3.2.1 Luminarias directas

Las luminarias directas son luminarias que dirigen el haz luminoso principalmente hacia abajo y se encuentran comúnmente en lugares con techos bajos, como oficinas. Ofrecen múltiples alternativas para controlar la distribución de la luz, como difusores y reflectores. No obstante, su uso puede dar lugar a techos oscuros y a una iluminación desigual en áreas con obstrucciones [3, p. 94].

2.3.2.2 Luminarias indirectas

Las luminarias indirectas son dispositivos de iluminación que proyectan el haz luz luminoso predominantemente hacia arriba. Pueden colgarse del techo, montarse en la pared o estar de pie por sí solas. Para funcionar eficientemente, requieren un techo de color claro.

Estas luminarias se diseñan para asegurar una distribución uniforme de la luz, evitando áreas excesivamente brillantes.

A pesar de tener una alta eficiencia luminosa, las instalaciones de iluminación que utilizan luminarias indirectas tienden a ser menos eficientes energéticamente en comparación con las luminarias directas debido a las pérdidas de energía al utilizar el techo como reflector secundario. Sin embargo, esto se compensa con un ambiente luminoso, una alta uniformidad de iluminación y la ausencia de deslumbramiento incómodo [3, p. 95].

2.3.2.3 Luminarias directas/indirectas

Las luminarias directas/indirectas son luminarias en las que la distribución de la luz se divide entre las direcciones ascendente y descendente. En muchos aspectos, las luminarias directas/indirectas ofrecen lo mejor de las luminarias directas e indirectas.

La eficiencia energética de una instalación de iluminación que utiliza luminarias directas/indirectas será mayor que la de una que utiliza luminarias indirectas y los problemas de techos oscuros y mala uniformidad de iluminancia se reducen gracias al componente indirecto. [3, p. 95].

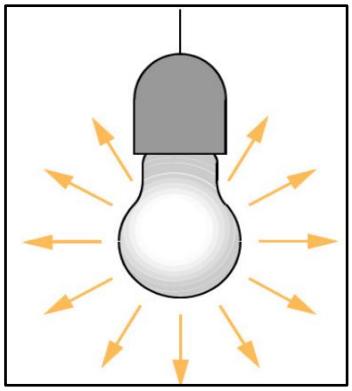
2.4 Parámetros de diseño de iluminación interior

2.4.1 Flujo luminoso

El flujo luminoso es la medida que indica la cantidad de luz emitida por una fuente de luz en un segundo. Se expresa en lúmenes (lm) y se representa con el símbolo ϕ. El flujo luminoso se utiliza para determinar la cantidad total de luz que emite una lámpara, sin embargo, no indica la dirección específica en la que la luz se irradia [21, p. 20].

Figura 15

Flujo luminoso



Nota: Imagen adaptada de la referencia [21, p. 20].

El flujo luminoso puede ser representado por la siguiente relación como se explica en el texto citado en [3, p. 3].

$$\emptyset = K_m \sum \psi_\lambda V_\lambda \Delta\lambda$$

Donde

Ø: Flujo luminoso (lumens)

ψ_λ: Flujo radiante en un pequeño intervalo Δλ (watts)

V_λ: Curva estándar de la sensibilidad espectral del ojo para visión fotópica

K_m: Constante 683 lm/ w (lumens/watts)

Δλ: Intervalo de longitud de onda

2.4.2 Intensidad luminosa

La intensidad luminosa, representada por la letra I, es la medida de la cantidad de luz emitida por segundo en una dirección específica. Se mide en candelas (cd). Por lo tanto, la intensidad es una unidad de luz que se utiliza para indicar la cantidad o concentración de luz en una dirección particular [21, p. 21].

Figura 16

Intensidad de flujo luminoso

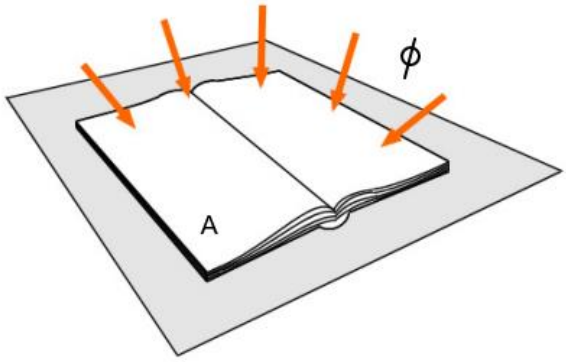
Nota: Imagen adaptada de la referencia [21, p. 21]

2.4.3 Iluminancia

La iluminancia, representada por la letra E, es la medida de la cantidad de luz o flujo luminoso (ϕ) que llega a una superficie. Se mide en lux, que es equivalente a un lumen de luz incidente por metro cuadrado de la superficie iluminada. La iluminancia no depende de la dirección desde la cual incide el flujo luminoso sobre la superficie, es decir, no importa el ángulo o la posición de la fuente de luz, sino simplemente la cantidad de luz que llega a la superficie.

Figura 17

Parámetro de Iluminancia



Nota: Imagen tomada de la referencia [21, p. 22]

De la Figura 17 la iluminancia en la superficie se expresaría como:

$$E = \frac{\emptyset}{A}$$

2.4.4 Luminancia

La luminancia de una superficie se refiere a la cantidad de luz emitida por unidad de área proyectada de esa superficie en una dirección específica. Se mide en candelas por metro cuadrado (cd/m²) y se emplea comúnmente para describir los estímulos visuales que se presentan al sistema visual como se explica en [3, p. 4].

2.4.5 Uniformidad de iluminación (U_o)

Según se indica en [3, p. 37] la uniformidad de iluminación se define como la relación entre la iluminancia mínima (E_{min}) y la iluminancia mantenida promedio (E_m) del área a evaluar como se muestra en la siguiente ecuación:

$$U_O = \frac{E_{min}}{E_m}$$

2.4.6 Temperatura de color

La temperatura de color establece una relación entre la luz emitida por una fuente y la luz emitida por un "cuerpo negro" que tiene la misma temperatura. Se expresa en grados Kelvin (K), lo que representa la temperatura absoluta del cuerpo negro que produciría una luz con una apariencia similar.

Según el rango de temperatura de color las luminarias se pueden clasificar en tres grupos como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 2

Clasificación de luminarias por temperatura de color

Temperatura de color	Aspecto de color
Menor de 3300 K	Cálida
3300K-5300K	Neutra
Más de 5300 K	Fría

Nota: Tabla tomada de la referencia [22, p. 26]

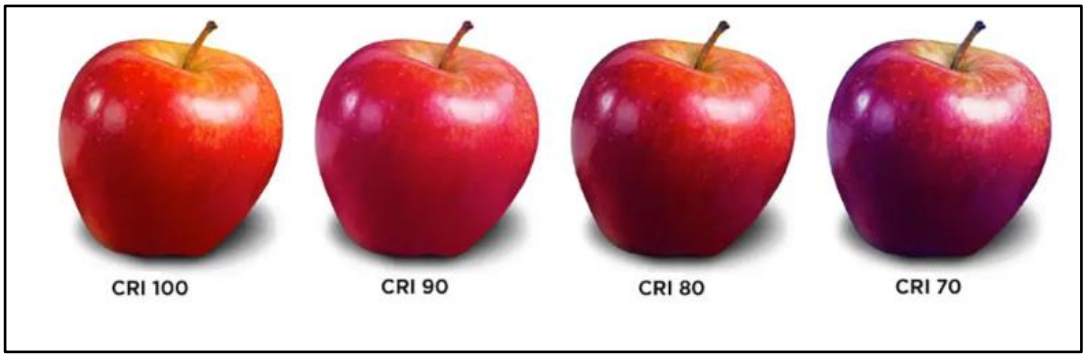
2.4.7 Índice de reproducción cromática

Según [21, p. 43] el "índice de reproducción cromática" es la capacidad de una fuente de luz para reproducir fielmente los colores en comparación con una fuente de luz ideal o estándar. Este índice se expresa comúnmente como el Índice de Reproducción Cromática (IRC) o CRI por sus siglas en inglés (Color Rendering Index).

El IRC es un número que varía de 0 a 100, donde un IRC de 100 indica una reproducción de color perfecta según [23]. Un IRC más alto significa que la fuente de luz es capaz de mostrar los colores de manera más precisa en comparación con una fuente de luz estándar. Por ejemplo, la luz del sol tiene un IRC de 100 porque es considerada la fuente de luz estándar para la evaluación de la reproducción del color.

Figura 18

Manzana iluminada en diferentes IRC



Nota: Imagen adaptada de la referencia [23]

2.4.8 Índice de deslumbramiento (UGR)

Es el efecto visual que ocurre ante la presencia de una fuente luminosa intensa y genera molestia o incomodidad visual.

La escala del deslumbramiento se mide en una escala de 10 a 30. Mientras más bajo sea el valor menor será la molestia según se indica en [3, p. 39].

El deslumbramiento se cuantifica como se muestra en la siguiente ecuación.

$$UGR = 8log_{10}\frac{0.25}{Lb}\sum\frac{Ls^2\omega}{p^2}$$

Donde:

UGR: Índice de deslumbramiento

Lb: Es la luminancia de fondo que percibe el usuario observador.

Ls: Hace referencia a la luminancia de cada luminaria que va en dirección hacia el usuario.

ω: Ángulo que forma la parte brillante de la luminaria desde la visión del usuario.

p: Hace referencia al índice de posición de cada luminaria, a nivel individual.

2.5 Iluminación circadiana

Según la referencia citada en [13], la iluminación circadiana se refiere a un enfoque de diseño de iluminación que tiene en cuenta el ritmo circadiano del cuerpo humano. El ritmo circadiano es el ciclo biológico que regula una variedad de procesos fisiológicos y comportamentales a lo largo de aproximadamente un ciclo de 24 horas. La iluminación circadiana busca replicar el patrón de luz natural a lo largo del día para influir en la regulación de los ritmos circadianos y, por lo tanto, en la salud y el bienestar de las personas.

2.5.1 Luz circadiana

Es una de medida la luz incidente en el ojo humano capaz de suprimir la síntesis de melatonina en la noche [1, p. 30].

Las siguientes ecuaciones definen la luz circadiana CLA

Para:

$$\int P_\lambda S_\lambda d\lambda - k \int P_\lambda V_{10\lambda} d\lambda > 0$$

$$CL_A = 1548\left(\int P_\lambda Mel_{1\lambda}\, d\lambda + a_1\left(\int P_\lambda S_\lambda\, d\lambda - k\int P_\lambda V_{10\lambda}\, d\lambda\right) - a_2\left(1 - e^{-\left(\frac{\int P_\lambda V'_\lambda d\lambda}{rodSat}\right)}\right)\right)$$

Para:

$$\int P_\lambda S_\lambda d\lambda - k \int P_\lambda V_{10\lambda} d\lambda \leq 0$$

$$CL_A = 1548\int P_\lambda Mel_{1\lambda}\, d\lambda$$

Donde

$Mel_{1\lambda}$: Es la función de eficiencia espectral de las células ganglionares de la retina que contienen melanopsina, con un pico en 484 nm, incluyendo el filtrado pre-retiniano del cristalino ocular

$V_{10\lambda}$: Es la función de eficiencia espectral de los conos de longitud media y larga

V'_λ: Es la función de eficiencia espectral del cono

S_λ: Sensibilidad espectral del cono S

P_λ: Es la irrandiancia espectral en el ojo expresado en ($W*m^{-2}*nm^{-1}$)

Los parámetros representan la interacción entre los tipos de fotorreceptores.

k: 0.2616 [9]

a_1: 0.7 [9]

a_2: 3.3[9]

rodSat [9] = 6.52

2.5.2 Estímulo circadiano

Es una métrica o medida utilizada para cuantificar el impacto de la exposición a la luz en el ritmo circadiano del cuerpo humano [1, p. 23] .

[9] Constantes del modelo de fototransducción del sistema circadiano humano.

El cálculo está definido por:

$$CS = 0.7\left(1 - \frac{1}{1 + (\frac{Cl_A}{355.7})^{1.1026}}\right)$$

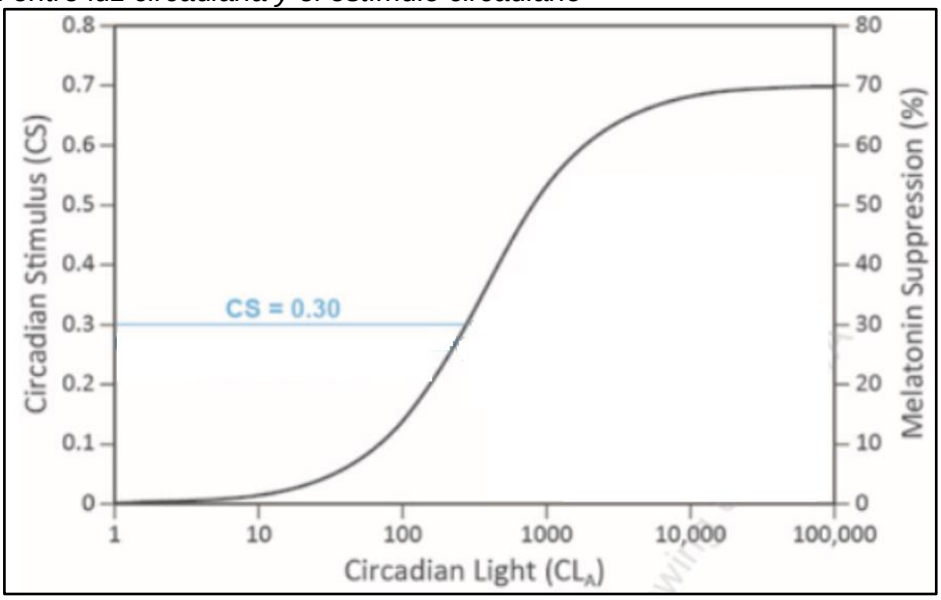
Se recomienda valores de exposición de al menos 2 horas a una iluminación que brinde un estímulo circadiano mayor a 0.3 durante el día y una exposición a un estímulo estimulo circadiano menor a 0.1 durante la noche.

2.5.3 Relación entre CL_A y CS

La siguiente figura muestra la relación entre la CLA y el CS.

Figura 19

Relación entre luz circadiana y el estímulo circadiano



Nota: Adaptado de la referencia [1, p. 17]

2.5.4 Consideraciones de diseño de iluminación circadiana

2.5.4.1 Cantidad y duración

Según la Guía de Diseño UL 24480, el estímulo circadiano que percibe una persona debe variar en magnitud según el horario del día.

El tiempo mínimo recomendado por la Guía de Diseño UL 24480 es de al menos 2 horas de exposición a un estímulo circadiano mayor a 0.3 en las mañanas, de preferencia

en el horario de 9:00 am 11:00 am como se indica en [1, p. 33]. La siguiente tabla muestra una posibilidad de diseño.

Tabla 3

Ejemplo de criterio de diseño de estímulo circadiano

Horario	Estimulo circadiano
7:00 am – 4:00 pm	CS≥ 0.3
4:00 pm –7:00 pm	0.1≤CS≤0.3
A partir de las 7:00 pm	CS≤0.1

Nota: Adaptado de [1, p. 33]

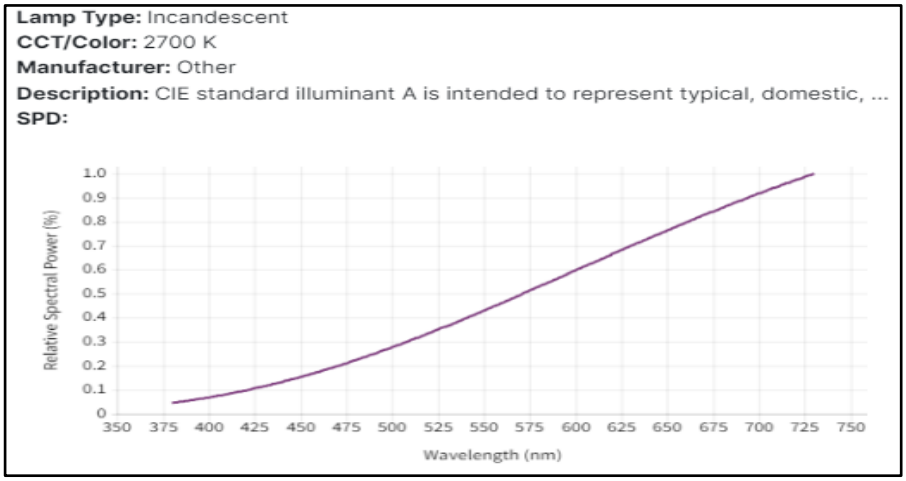
2.5.4.2 Distribución espectral de la luminaria

Es importante conocer la distribución espectral de la luminaria, debido a que esta es necesaria para el cálculo del estímulo circadiano. Este parámetro puede ser proporcionado por el proveedor de la luminaria, medido con un espectrofotómetro o tomando las curvas típicas de distribución espectral que se encuentra disponibles en la referencia [24].

La distribución espectral de las luminarias se diferencia según el tipo de tecnología y la temperatura de color de esta, las figuras a continuación muestran curvas típicas de la distribución espectral para los diferentes tipos de tecnología de iluminación.

Figura 20

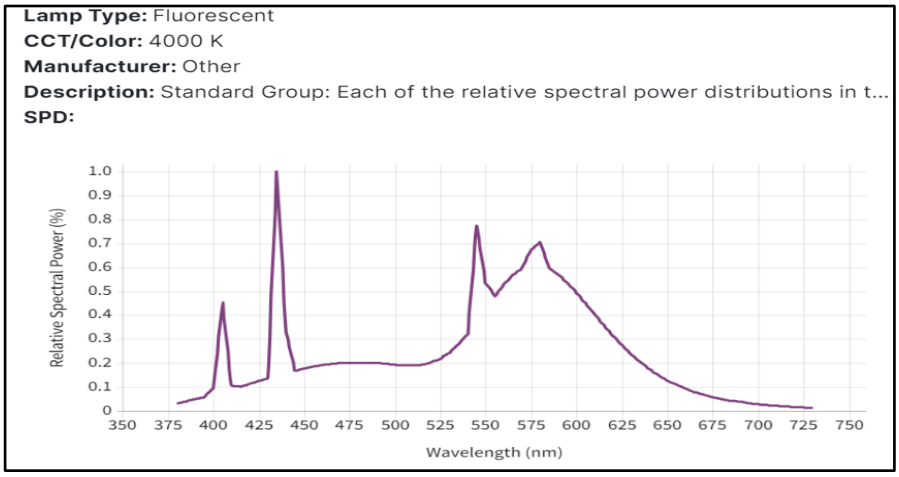
Luminaria incandescente de 2700 K



Nota: Imagen de la referencia [24].

Figura 21

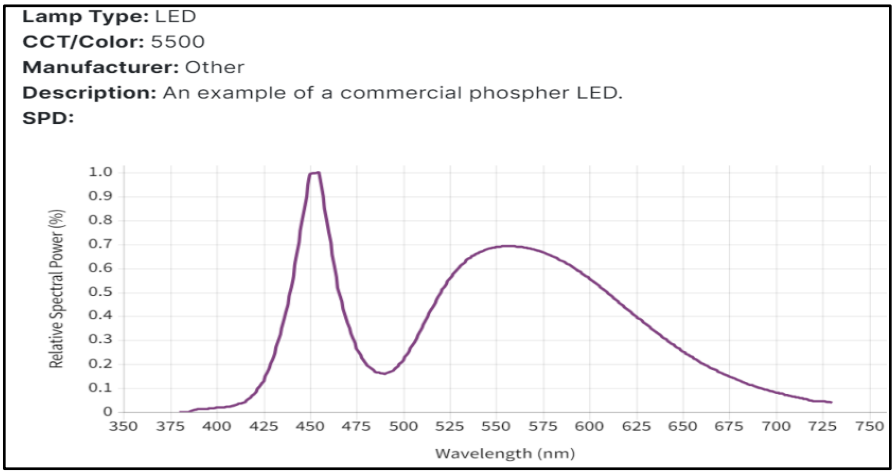
Luminaria fluorescente de 4000 K



Nota: Imagen de la referencia [24].

Figura 22

Luminaria LED de 5500 K



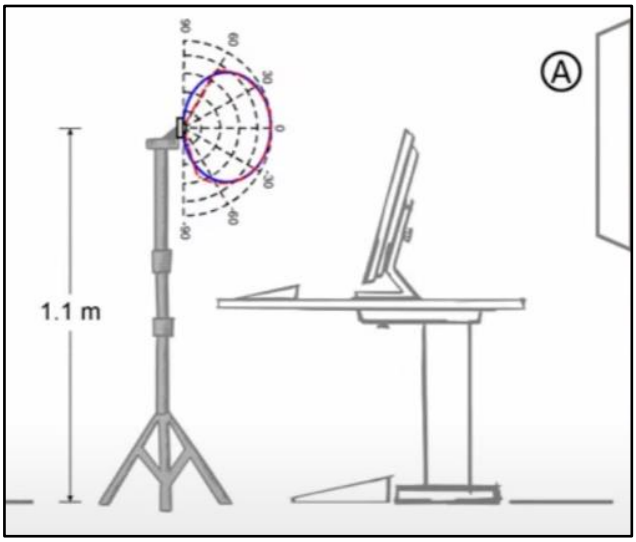
Nota: Imagen de la referencia [24]

2.5.4.3 Iluminancia vertical (E_V)

La iluminancia vertical se refiere a la iluminancia que sería percibida al nivel de los ojos por los ocupantes de la instalación interior. Según la guía de diseño la altura a la cual se calcularía la iluminancia vertical es 1.1 m sobre el nivel piso acabado. En la etapa de diseño su valor se obtiene mediante el uso de un software de iluminación tomando los valores de iluminancia en las posiciones donde estarían ubicadas las personas. Este parámetro es requerido junto con el espectro de la luminaria para calcular el estímulo circadiano.

Figura 23

Medición de iluminancia vertical



Nota: Imagen de la referencia [1, p. 27]

2.5.5 Calculadora de estímulo circadiano

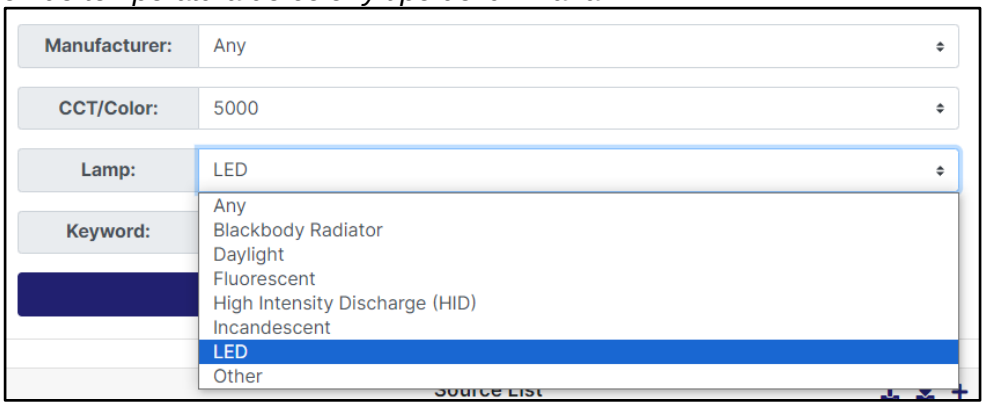
La Guía de Diseño UL 24480 adjunta como herramienta de cálculo la calculadora de estímulo circadiano citado en [1, p. 17].

El estímulo circadiano se calcula en función de la iluminancia vertical en un plano a una altura 1.1 m sobre el nivel del piso acabado y la distribución espectral de la fuente de luz. Su uso se detalla a continuación:

Paso 1: Ingresar distribución espectral de luminaria o seleccionar alguna distribución espectral de la luminaria acorde a la temperatura de color y el tipo de tecnología.

Figura 24

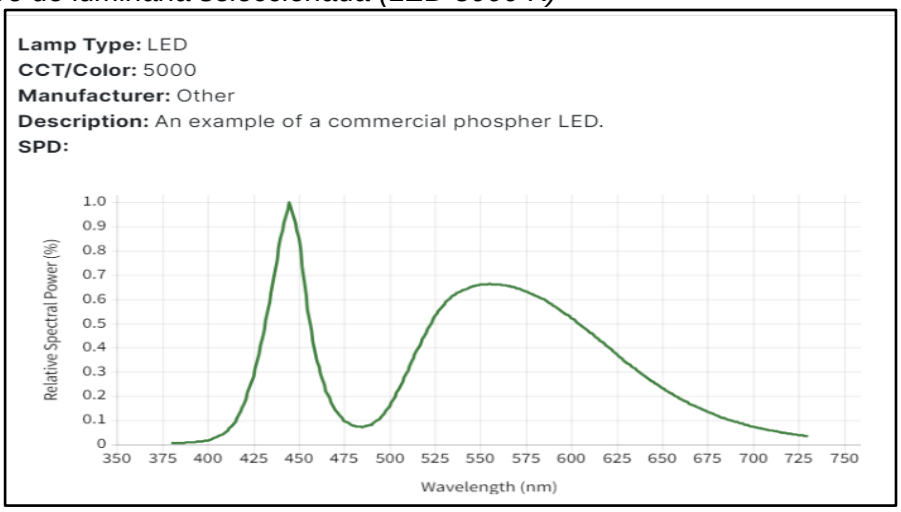
Selección de temperatura de color y tipo de luminaria



Nota: Imagen de la referencia [24]

Figura 25

Espectro de luminaria seleccionada (LED 5000 K)



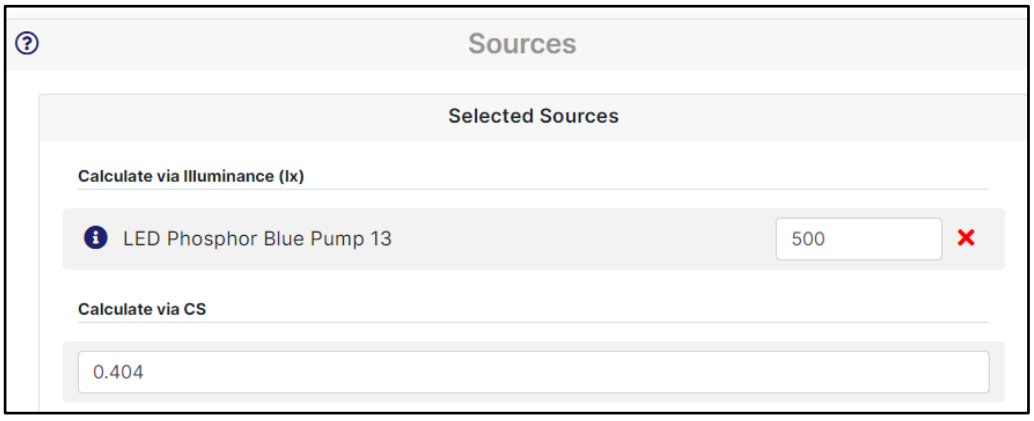
Nota: Imagen de la referencia [24]

Paso 2: Indicar el nivel de iluminancia vertical (E_v) que estaría percibiendo una persona a la altura de 1.1 m, sobre el nivel del piso, en la ubicación donde normalmente se encuentre y realizar el cálculo

En el caso de oficinas esta ubicación sería en los escritorios de sus estaciones de trabajo.

Figura 26

Estímulo circadiano calculado



Nota: Imagen de la referencia [24]

2.6 Normativa local y estándares internacionales

En esta sección se mencionarán los requerimientos vigentes de normas de iluminación locales e internacionales y estándares más relevantes respecto a iluminación en interiores.

2.6.1 Norma Básica de Ergonomía y de Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico

De acuerdo a lo citado en [25, p. 1], la Norma Básica de Ergonomía y Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico tiene como objetivo principal establecer parámetros para adaptar las condiciones laborales a las características físicas y mentales de los trabajadores, garantizando bienestar, seguridad y eficiencia en su desempeño

La siguiente tabla muestra los niveles mínimos de iluminancia establecidas en diferentes áreas de trabajo.

Tabla 4

Parámetros de iluminación requeridos en la Norma Básica de Ergonomía

Exteriores	**Lux**
Tarea visual de puesto de trabajo Patios, tránsito, estacionamiento	20
Interiores	
Almacenes, pasillos, escaleras, movimiento de vehículos	50
Requerimiento visual simple	
Áreas de servicio al personal, casetas de vigilancia, inspección visual	200
Distinción moderada de detalles	
Aulas, oficinas, inspección simple	300
Distinción clara de detalles	
Maquinado, acabado delicados, ensamble e inspección, laboratorios, áreas de dibujo	500
Distinción fina de detalles	
Máquina de precisión, talleres de alta precisión y trabajos delicados	750

Nota: Tomado de la referencia [25, p. 23]

La norma solo indica valores mínimos de iluminancia requeridos, más no indica los otros parámetros como uniformidad y deslumbramiento que también son importantes para un adecuado rendimiento visual.

2.6.2 Norma Técnica del RNE EM.010

La Norma Técnica del RNE EM.010 establece los requisitos mínimos de iluminación para alumbrado de vivienda, educación, salud, industria, oficinas, estacionamiento etc. Los valores indicados para oficinas están dados según la Tabla 5.

Tabla 5

Parámetros de iluminación requeridos en la Norma Técnica EM.010 del RNE

Tipo de interior, tarea o actividad	Em lux	UGRL	Uo	R_a
Archivo, copia, circulación, etc	300	19	0.4	80
Escritura, mecanografía, lectura, procesamiento de datos	500	19	0.6	80
Estación de trabajo CAD	500	19	0.6	80
Salas de conferencias y reuniones	500	19	0.6	80
Archivos	200	25	0.4	80

Nota: Adaptado de la referencia [26, p. 19]

2.6.3 Norma UNE-EN 12464-1

La norma española UNE-EN 12464-1 [10] establece los siguientes parámetros para oficinas según la Tabla 6.

Respecto a la iluminancia de las áreas de trabajo, la segunda columna de la tabla indica los niveles mínimos requeridos de iluminancia mantenida y la tercera columna indica valores modificados por contexto según la Tabla 7.

La cuarta columna indica los valores deslumbramiento, la quinta columna indica los valores de uniformidad y la sexta columna indica el índice de reproducción cromática.

Adicionalmente se indican valores recomendados de iluminancia para la pared y el techo.

[10] Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico CTN 72 y sustituye a la Norma UNE-EN 12464-1:2012.

Tabla 6

Parámetros de iluminación en oficinas según la UNE-EN-12464-1

Tipo de interior, tarea o actividad	E_m lx		UGRL	U_o	R_a	$E_{m,z}$ lx	E_m, pared lx	E_m, techo lx
	requerido	modificado				Uo≥ 0.10		
Archivo, copia, circulación, etc	300	500	19	0.4	80	100	100	75
Escritura, mecanografía, lectura, procesamiento de datos	500	1000	19	0.6	80	150	150	100
Dibujo técnico	500	1000	16	0.6	80	150	150	100
Salas de conferencias y reuniones	500	1000	19	0.6	80	150	150	100
Mesas de reuniones	500	1000	19	0.6	80	150	150	100
Mostrador de recepción	200	300	22	0.6	80	100	100	75

Fuente: UNE-EN.12464-1 marzo del 2022

Tabla 7

Modificadores de contexto para aumentar la iluminancia mantenida

La visualización en el trabajo es crítica
Los errores son costosos de rectificar
La precisión, una mayor productividad o una mayor concentración son de gran importancia
Los detalles de los objetos en la tarea son de tamaño inusualmente pequeño o de bajo contraste
La tarea se realiza durante un tiempo inusualmente largo
El área de tare o el área de actividad tiene poca luz natural
La capacidad visual del trabajador es inferior a la norma

Nota: UNE-EN.12464-1 marzo del 2022

La norma UNE-EN 12464-1 no establece métricas específicas para la sincronización del ritmo circadiano. Sin embargo, en el apartado 6.6, la norma reconoce la importancia de la variabilidad de la luz a lo largo del tiempo, incluyendo factores como la iluminancia, la temperatura de color o el espectro. Esto es relevante en lugares con ocupación prolongada, como oficinas, centros educativos y fábricas, ya que estos aspectos tienen un impacto significativo en el bienestar de las personas.

La norma indica que al variar la iluminación es posible que no se cumplan los requisitos de iluminación indicados en la Tabla 6; sin embargo, estos deben seguir siendo alcanzables.

En el anexo B.5 de la norma se indica que la radiación óptica basada en el espectro fotópico V(λ) no es suficiente y que el efecto biológico real de su exposición depende de la estimulación percibida por sus cinco fotorreceptores.

2.6.4 Guía de Diseño UL 24480

La Guía de Diseño UL 24480, “Design Guideline for Promoting Circadian Entrainment with Light for Day-Active People”, brinda las bases para un diseño que considere el impacto de la luz en el ritmo circadiano de las personas mediante la métrica del estímulo del estímulo circadiano. La guía se limita a indicar las pautas para el diseño de iluminación que promueve el bienestar de las personas en edificaciones que sean usadas por personas activas en el día e inactivas en la noche [1, p. 3].

2.6.4.1 Bienestar

El bienestar se define como un estado de salud holística que abarca múltiples dimensiones, incluyendo la física, emocional, social y cognitiva.

El bienestar en salud va más allá de la mera ausencia de enfermedad, e implica un estado de equilibrio integral en diversos aspectos de la vida. Incluye factores como la felicidad, el placer, la virtud, el conocimiento y la satisfacción de deseos y necesidades.

La promoción del bienestar en salud es un proceso clave para mejorar la calidad de vida de las personas, a través de la prevención, la educación y el fomento de estilos de vida saludables [27, p. 3].

2.6.4.2 Iluminación que promueve el bienestar

Si bien no existe una medida que permita determinar numéricamente el bienestar de una persona, la Guía de Diseño UL 24480 nos proporciona el parámetro estímulo circadiano y las condiciones de exposición mínimas durante el día (al menos 2 horas en la mañana por la un CS≥0.3) y la recomendación de una exposición a un estímulo circadiano menor a 0.1 durante la noche. Esta exposición diaria debería ser la suficiente para mejorar el sueño, disminuir la somnolencia durante el día, disminuir síntomas de depresión y riesgo de contraer enfermedades como la diabetes, obesidad y cáncer según [1, p. 8].

Capitulo III Hipótesis y operacionalización de variables

3.1 Hipótesis general

Es posible mejorar el diseño de iluminación en oficinas mediante el diseño y evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación para promover el bienestar en oficinas en base a la Guía de Diseño UL 24480.

3.2 Hipótesis específicas

- Es posible diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la normativa local en oficinas.
- Es posible diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la Guía de Diseño UL 24480 en oficinas.

3.3 Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicador	Unidades
Variable independiente (x): Evaluación de la viabilidad técnica	La evaluación de la viabilidad técnica es el análisis de la capacidad de un proyecto para ser realizado con los recursos tecnológicos, conocimientos y habilidades disponibles.	La evaluación de la viabilidad técnica se realizará a través del cumplimiento de la normativa local y los requisitos de la Guía de Diseño UL 24480.	1.Normativa local. 2.Guía de Diseño UL 24480.	1. Porcentaje de cumplimiento 2. Porcentaje de cumplimiento	1. 0-100 % 2. 0-100 %
Variable dependiente (y): Diseño de iluminación	El diseño de iluminación se refiere a la planificación y ejecución de sistemas lumínicos, considerando aspectos técnicos, estéticos y funcionales para crear ambientes deseados.	Es un diseño que se basa en la Guía de Diseño UL 24480 y la normativa local.	1.Rendimiento visual.	1.Iluminancia 2.Uniformidad 3.Deslumbramiento	1. Lux 2. 0-100% 3. cd/m^2
			2.Bienestar	1.Estímulo circadiano 2.Tiempo de exposición	1.Escala 0.0-0.7 2.Horas

Nota: Elaboración propia

Capítulo IV Metodología de la investigación

La metodología de la investigación consta de los siguientes puntos:

4.1 Tipo de investigación

Para caracterizar el tipo de investigación se usaron las siguientes características:

- Percepción de la realidad: Se busca la objetividad y se intenta minimizar la influencia del investigador para obtener resultados generalizables y medibles como los parámetros de diseño de iluminación.
- Razonamiento: Es deductivo, ya que se parte de una teoría y de ésta se derivan las hipótesis las cuales se sometieron a prueba mediante el análisis de resultados numéricos en el cual se contrastaron las hipótesis.
- Orientación: Es orientada al resultado debido a que se centra en el resultado final del diseño y en medir los resultados específicos como la iluminancia, deslumbramiento, uniformidad y estímulo circadiano.
- Perspectiva del investigador: El investigador se mantiene alejado del contexto de estudio para asegurar la objetividad y la neutralidad, es decir, al margen de los datos.
- La presente tesis presenta el diseño de iluminación en oficinas no solo desde un punto de vista técnico, sino también considerando el bienestar integral de las personas. Este enfoque holístico es fundamental para comprender cómo la iluminación en el entorno de trabajo, influye en el ritmo circadiano y, en última instancia, en la salud y el bienestar de los ocupantes.

Estas características descritas corresponderían a una investigación de tipo mixta, ya que posee características cuantitativas y cualitativas.

4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación es no experimental ya que no se manipula variable independiente para ver su efecto en la variable dependiente [28, p. 151].

4.3 Nivel de la investigación

Esta tesis es de nivel aplicativo, ya que se centra en resolver un problema práctico mediante la aplicación de teorías y normativas en un contexto. Su objetivo principal es desarrollar soluciones concretas que puedan promover el bienestar de los ocupantes en las oficinas.

4.4 Unidad de análisis

La unidad de análisis es la oficina del piso 8 de la Torre Javier Prado ubicado Av. Javier Prado Este 444, San Isidro 15046, departamento de Lima-Perú.

Esta oficina inicio sus actividades en el 2019 y cuenta con una capacidad de 113 estaciones de trabajo.

4.5 Instrumentos de recolección de datos

Se utilizó un luxómetro digital para medir la iluminancia en los diferentes espacios que normalmente se encuentran ocupados. Todos los datos de iluminancia se registraron en lux (lx). Adicionalmente se usó el software Dialux para recolectar los datos de los parámetros de iluminación del diseño de iluminación mediante las simulaciones realizadas en el software.

Capítulo V Desarrollo de la tesis

En este capítulo se evaluará si la iluminación percibida por los trabajadores es la adecuada en base a la métrica del estímulo circadiano (CS) de la Guía de Diseño UL 24480. Posterior a ello se propondrá un diseño de iluminación que será validado por el software de iluminación, Dialux evo, con tres diferentes escenarios que cumplan técnicamente tanto con la normativa local y lo indicado en la Guía de Diseño UL 24880 en la medida de lo posible.

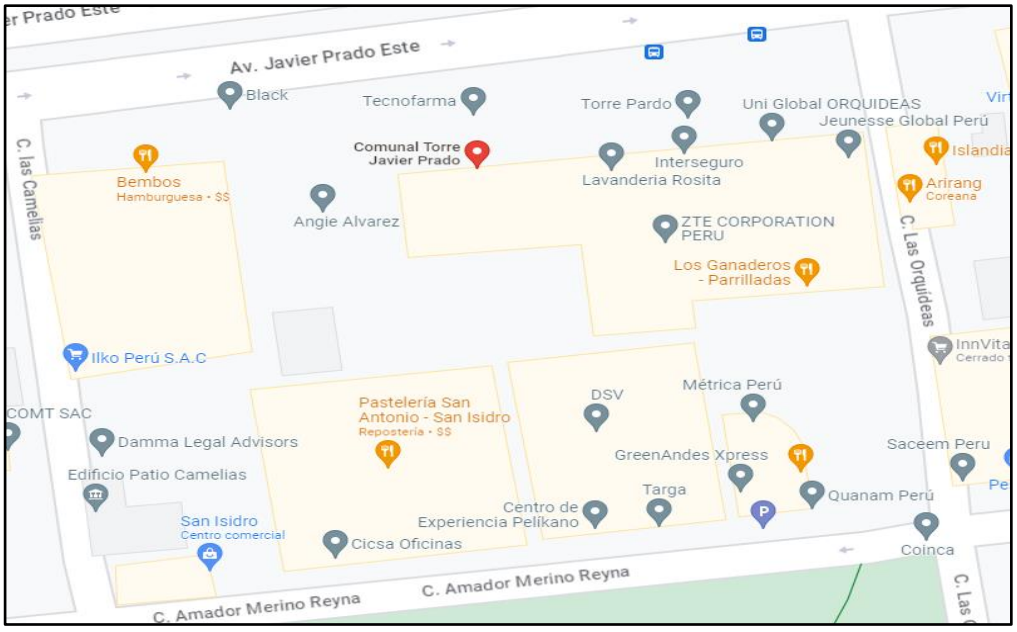
5.1 Evaluación del sistema de iluminación interior del piso 8 de la Torre Javier Prado

5.1.1 Ubicación geográfica

La oficina se encuentra ubicada en San Isidro, departamento de Lima. Esta oficina se encuentra en el piso 8 de la edificación Torre Javier Prado.

Figura 27

Ubicación de la oficina



Nota: Google Maps

5.1.2 Estación de trabajo

Las estaciones de trabajo son muebles que están ubicados dentro de la oficina, en los cuales pueden ubicarse desde 1 una persona hasta 10 personas según el tamaño del mueble. La oficina cuenta con 24 estaciones de trabajo. La Figura 28 muestra las ubicaciones de estas estaciones, las cuales están resaltadas en rojo.

Figura 28

Ubicaciones de las estaciones de trabajo

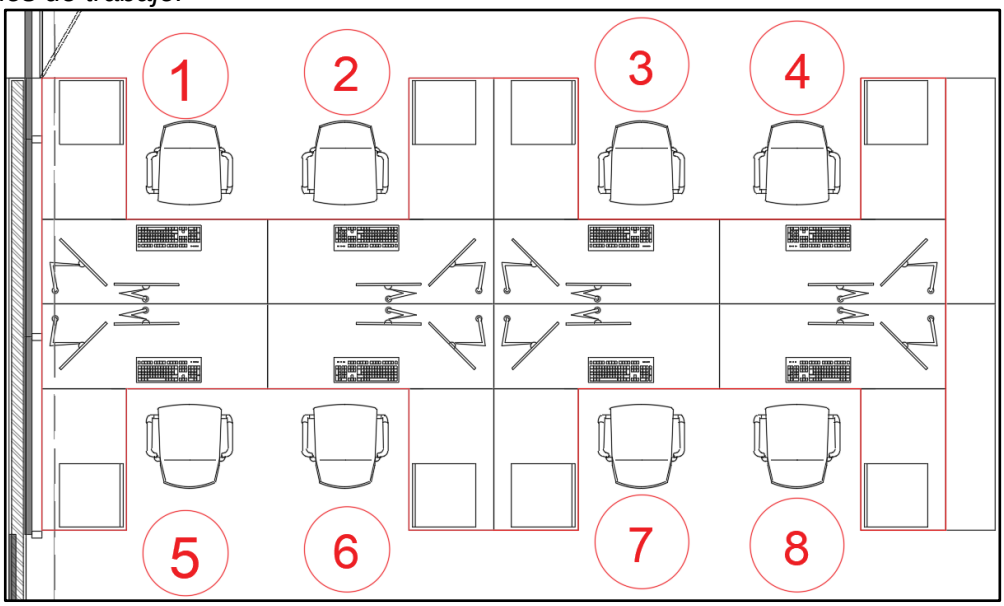
Nota: Elaboración propia

5.1.3 Escritorio de trabajo

Se considera escritorio de trabajo, el espacio que ocupa un trabajador en una estación de trabajo dentro de la oficina. La siguiente figura muestra una estación de trabajo, con sus escritorios.

Figura 29

Escritorios de trabajo.



Nota: Elaboración propia

En la Figura 29 se muestra una estación de trabajo que cuenta con 8 escritorios de trabajo.

5.1.4 Disposición y cantidad de trabajadores en la oficina abierta

La oficina abierta del piso 8 cuenta con 24 estaciones de trabajo, las cuales han sido clasificadas según la cantidad de personas que las ocupan como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 8

Total de personas en la oficina

Tipo	Cantidad	Total de personas
Individuales	2	2
Para 2 persona	4	8
Para 3 personas	2	6
Para 4 personas	5	20
Para 5 personas	1	5
Para 6 personas	5	30
Para 8 personas	4	32
Para 10 personas	1	10
	24	113

Nota: Elaboración propia

La oficina abierta cuenta con 113 trabajadores como máximo distribuidos en las 24 estaciones de trabajo.

5.1.5 Horario de trabajo

El horario de trabajo en la oficina es de 8:00 am a 6:00 pm y se dispone de 1 hora para el almuerzo, la cual es de 12:00 pm a 1:00 pm. Los trabajadores almuerzan fuera de la oficina, por lo tanto, la ocupación efectiva de las oficinas sería de al menos 9 horas a lo largo del día bajo la exposición de luz artificial presente en esta.

5.1.6 Luminarias del sistema de iluminación actual

Actualmente, el sistema de iluminación en la oficina del piso 8 está conformado por dos tipos de luminarias las cuales son de tecnología LED. La Tabla 9 muestra un resumen de las características de las luminarias presentes en la oficina.

Tabla 9

Resumen de características de luminarias de la oficina

Marca	Lumen (lm)	Potencia (W)	Temperatura de color (K)
ALPHALED	1301	12.5	4000
LEDUX	1100	10.0	4000

Nota: Elaboración propia

Las luminarias en la oficina no tienen algún tipo de control que permita modular la potencia o temperatura de color, por lo tanto, la iluminación artificial percibida por los ocupantes de la oficina es constante a largo del día.

5.1.6.1 Mediciones

Con el fin de cuantificar el estímulo circadiano se realizaron mediciones de iluminancia vertical, que sería percibida por los trabajadores cuando se encuentren sentados, con el luxómetro digital UNI-T UT-383. Para mayor detalle del instrumento, ver

Las mediciones requirieron el uso de un trípode como soporte fijo para medir la iluminancia a 1.1 m sobre el nivel del piso, la cual es la altura de referencia de la Guía de Diseño UL 24480.

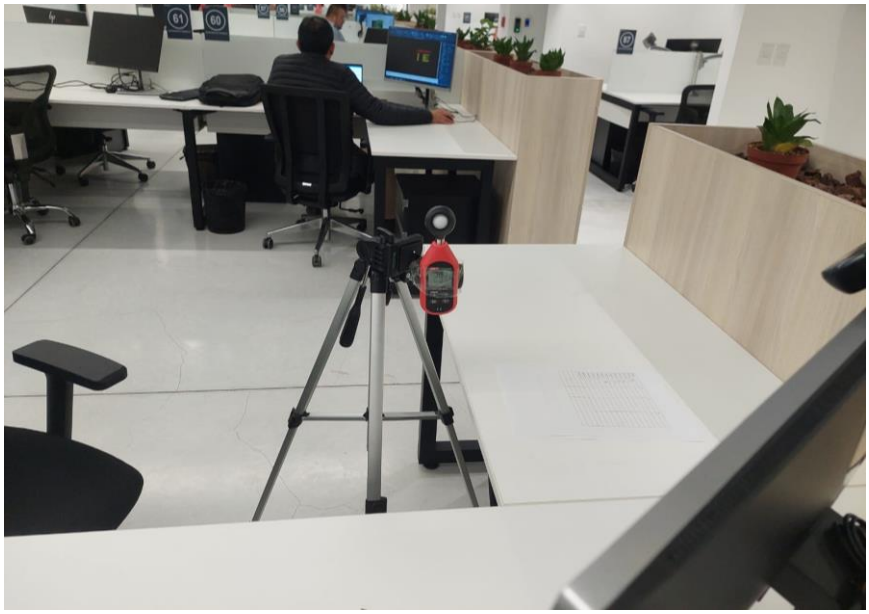
Tabla 10

Características del luxómetro digital usado

Marca	UNI-T
Modelo	UT383
Rango	0-200,000 lx
Frecuencia de muestreo	2 veces por segundo

Nota: Ficha técnica del producto

Figura 30 Montaje de luxómetro a soporte para mediciones



Nota: Imagen tomada por el autor de la tesis

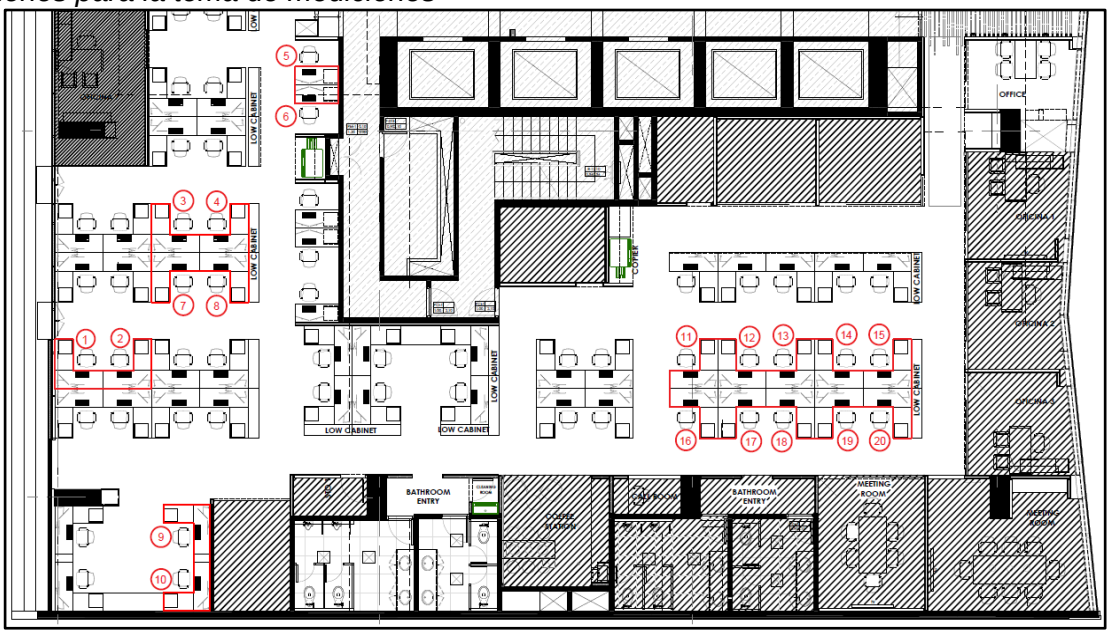
Las mediciones se realizaron en el horario de 10:00 am a 11:00 am, horario en el cual se debería presentar un estímulo circadiano (CS≥ 0.3), según se indica en la Guía de Diseño UL 24480.

5.1.6.2 Cálculo del estímulo circadiano

Para el cálculo del estímulo circadiano se tomó en cuenta la iluminancia vertical (E_v) de las estaciones de trabajo a la altura de 1.1 m según se indica en la Guía de Diseño UL 24480. Se realizaron 20 mediciones en diferentes ubicaciones donde los trabajadores estarían expuestos normalmente. En la Figura 31 se muestran las ubicaciones donde se realizaron las mediciones.

Figura 31

Ubicaciones para la toma de mediciones



Nota: Elaboración propia

El cálculo para el escritorio que se encuentra en la ubicación N ° 1 es mostrado a continuación:

Paso 1. Registrar la iluminancia vertical.

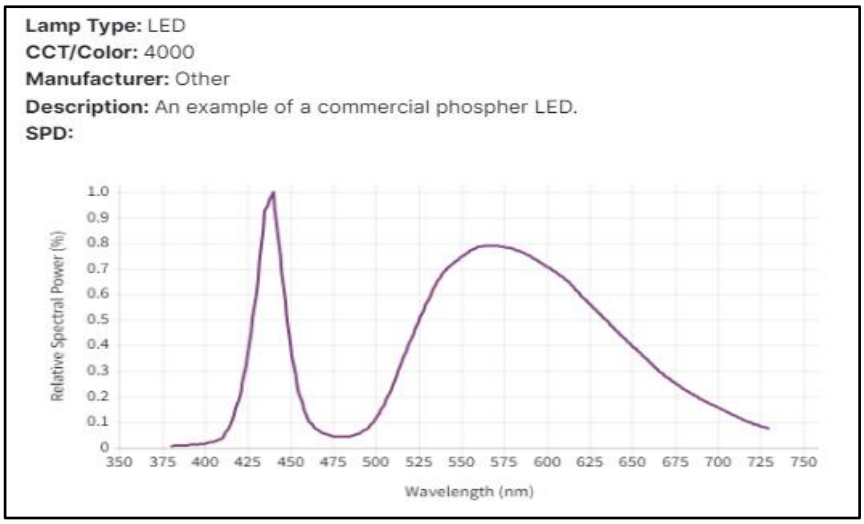
E_v=269 lux

Paso 2. Seleccionar la curva de distribución espectral.

Se selecciona una curva de una temperatura de color de 4000 K

Figura 32

Luminaria tipo LED de CCT 4000 K



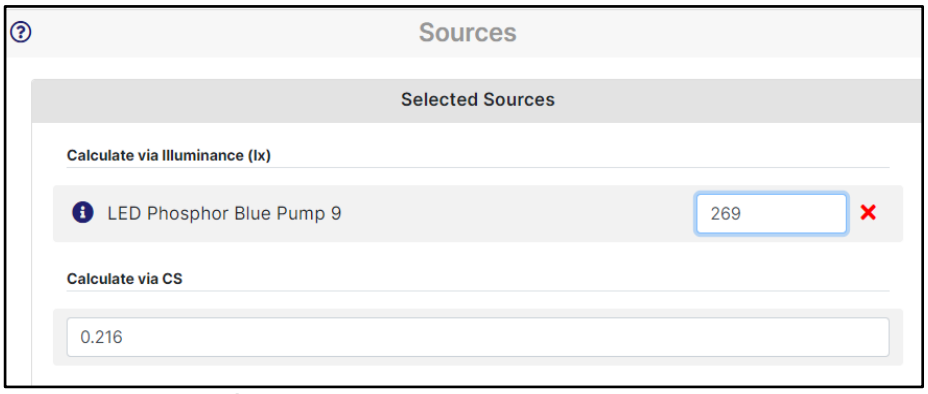
Nota: Imagen tomada de la referencia [24]

Paso 3. Cálculo del estímulo circadiano.

Finalmente, el cálculo requiere el ingreso de la iluminancia vertical en la interfaz de la calculadora de estímulo circadiano, como se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Interfaz de la calculadora de estímulo circadiano



Nota: Calculadora de estímulo circadiano de la fuente [24]

Los resultados obtenidos del estímulo circadiano, de todas las ubicaciones consideradas, se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Estímulo circadiano percibido en la oficina

Ubicación	E_v (lux)	CS≥0.3 (10:00 am- 11:00 am)	
Escritorio 1	269	0.216	No cumple
Escritorio 2	267	0.215	No cumple
Escritorio 3	243	0.200	No cumple
Escritorio 4	265	0.214	No cumple
Escritorio 5	170	0.148	No cumple
Escritorio 6	250	0.204	No cumple
Escritorio 7	314	0.243	No cumple
Escritorio 8	203	0.172	No cumple
Escritorio 9	280	0.223	No cumple
Escritorio 10	190	0.163	No cumple
Escritorio 11	277	0.221	No cumple
Escritorio 12	342	0.258	No cumple
Escritorio 13	263	0.212	No cumple
Escritorio 14	285	0.226	No cumple
Escritorio 15	267	0.215	No cumple
Escritorio 16	294	0.231	No cumple
Escritorio 17	240	0.198	No cumple
Escritorio 18	268	0.215	No cumple
Escritorio 19	303	0.236	No cumple
Escritorio 20	306	0.238	No cumple

Nota: Elaboración propia

5.2 Consideraciones generales de diseño

5.2.1 Arquitectura de la oficina

La altura del piso 8 de la edificación se consideró a 3 m como se indica en el plano de arquitectura de la oficina.

La arquitectura del diseño se realizó de acuerdo con el plano de arquitectura del

Figura 34

Arquitectura de la oficina en Dialux

Nota: Elaboración propia

5.2.2 Alcance

El diseño de iluminación se limita a la oficina abierta del piso de 8 de la Torre Javier Prado.

5.2.3 Exclusiones

Se excluyen del diseño de iluminación espacios que tienen un periodo de ocupación breve como los baños, la estación de café y salas de reuniones debido a que es necesario diseñar en las ubicaciones donde la exposición a la luz artificial es más prolongada.

5.2.4 Horario de diseño

El horario de diseño se considera desde el horario de 7:00 am hasta las 7:00 pm, considerando que los trabajadores podrían ocupar las oficinas 1 hora más temprano y desocuparlas 1 hora más tarde.

5.2.5 Reflectancias

Las superficies de la pared, techo y pared de la oficina son caracterizadas por tener colores blancos o claros, por ende, se considera los factores de reflexión indicados en la Tabla 12.

Tabla 12

Factores de reflexión en superficies

	Color	Factor de reflexión
Techo	Blanco o muy claro	0.7
	Claro	0.5
	Medio	0.3
Paredes	Claro	0.5
	Medio	0.3
	Oscuro	0.1
Suelo	Claro	0.3
	Oscuro	0.1

Nota: Resolución Ministerial N.º 706-2007-MINSA

Las reflectancias consideradas son las siguientes:

- Techo: 70%
- Paredes: 50%
- Piso: 30%

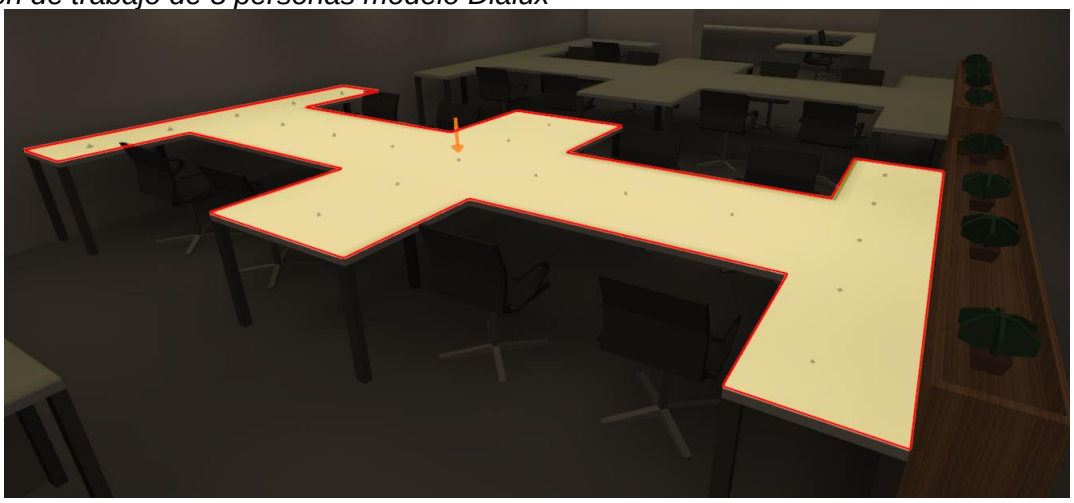
5.2.6 Áreas de tarea visual

Las estaciones de trabajo son consideradas como las áreas de tarea visuales para el cálculo de los parámetros de iluminación, ya que es sobre estás donde se realizan las actividades visuales como la escritura, lectura de planos, documentos, etc.

La Figura 35 muestra la superficie de la parte superior de una de las estaciones de trabajo donde se realizan los cálculos. En la Figura 36 se aprecia la misma estación en vista de planta.

Figura 35

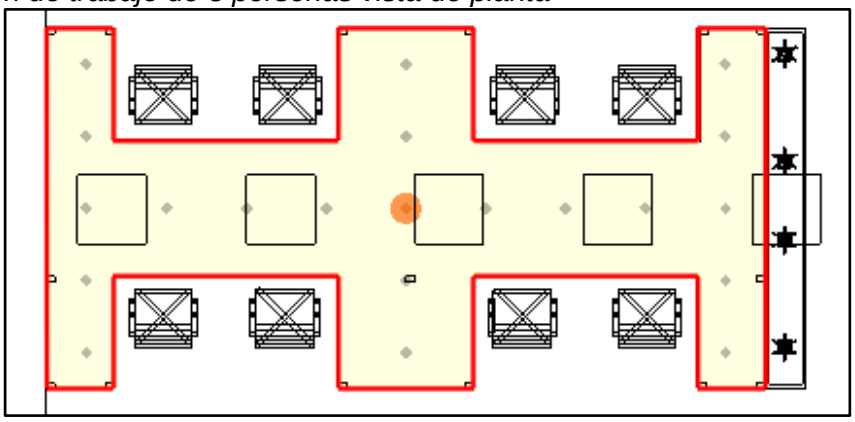
Estación de trabajo de 8 personas modelo Dialux



Nota: Elaboración propia

Figura 36

Estación de trabajo de 8 personas vista de planta



Nota: Elaboración propia

La altura de los escritorios se consideró de 0.80 m, la cual es una altura típica para estos muebles en oficinas.

5.3 Diseño de iluminación circadiana

Para el diseño de iluminación circadiana primero se estableció un criterio de iluminación circadiana y luego se realizó el diseño de un sistema de iluminación que cuenta

con tres escenarios de iluminación, los cuales se diferencia por la intensidad y temperatura de color de las luminarias.

5.3.1 Criterio de diseño de iluminación circadiana

El horario de diseño para la oficina es de 7:00 am a 7:00 pm de lunes a viernes. Dentro de este horario se establece valores de estímulo circadiano según el horario como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Criterio de diseño de iluminación circadiana

Escenario	Horario	Estimulo circadiano
N°1	7:00 am a 11:00 am	CS≥ 0.3
-	11:00 am a 12:00 am	Transición
N°2	12:00 pm a 5:00 pm	0.2≤CS≤0.3
-	5:00 pm a 6:00 pm	Transición
N°3	6:00 pm a 7:00 pm	0.1≤CS≤0.2

Nota: Elaboración propia

Los horarios indicados como transición son necesarios para realizar el cambio de escenario mediante la regulación gradual de la intensidad y la temperatura de color de la luminaria. Esta acción sería realizada por el sistema de control de la luminaria.

5.3.2 Luminarias

El diseño de iluminación consideró luminarias dimerizables, que tengan la capacidad de variar su temperatura de color. Se consideró la luminaria de la marca Cooper Lighting con las características mencionadas en la Tabla 14.

La Figura 37 muestra el tipo de lampara usada y la Figura 38 muestra la fotometría de la luminaria. El

Tabla 14

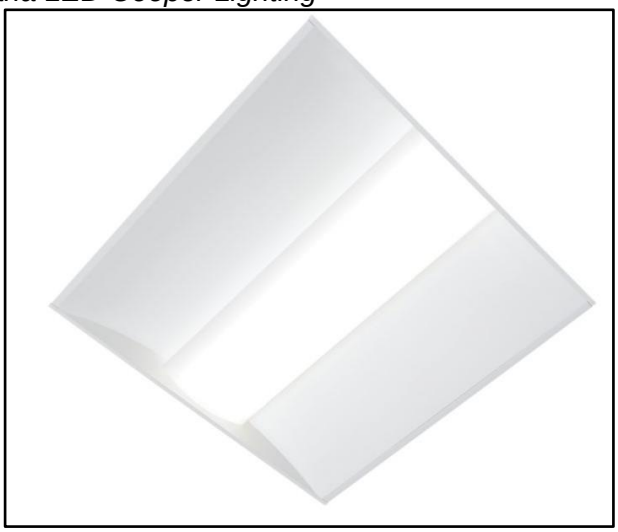
Características principales de la luminaria

Parámetro	Valor
Lumen (lm)	3500
Potencia (W)	28.8
Dimerizable	Sí
Temperatura de color (K)	2700 K -6500 K
IRC	80

Nota: Elaboración propia

Figura 37

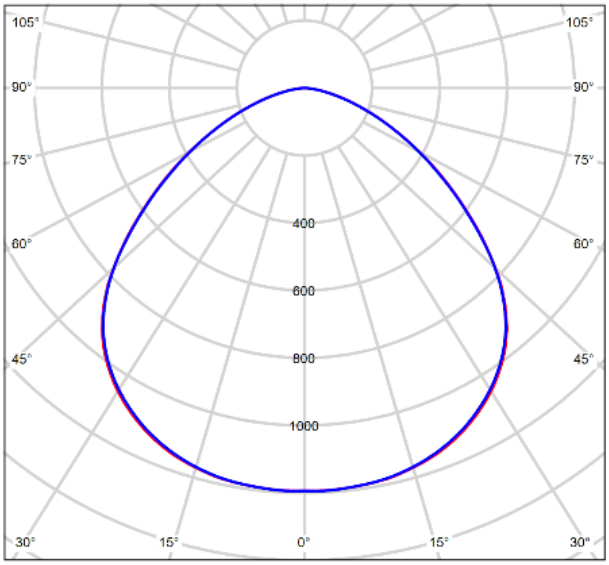
Luminaria LED Cooper Lighting



Nota: Luminaria de la marca Cooper Lighting

Figura 38

Fotometría de la luminaria



Nota: Elaboración propia

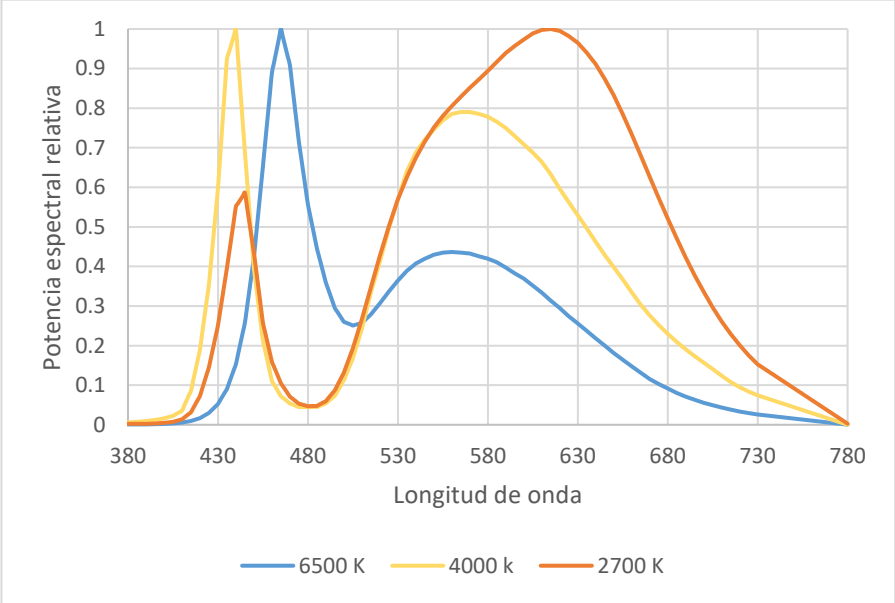
5.3.2.1 Distribución espectral de luminarias

Las distribuciones espectrales fueron consideraras según las luminarias comerciales indicadas en la referencia [24] .

El diseño considero un solo tipo de luminaria, la cual tiene una temperatura de color en el rango ajustable en rango de 2700K a 6500K. La Figura 39 muestra la distribución espectral de la luminaria en tres diferentes temperaturas de color 6500 K, 4000 K y 2700 K.

Figura 39

Distribución espectral de las luminarias



Nota: Adaptado de “Light and Health Research Center” [24]

5.3.3 Escenarios de iluminación

El diseño propuesto considera tres escenarios, los cuales difieren en la atenuación de la luz emitida por la luminaria y la temperatura de color de estas. Se considera los escenarios a continuación:

Escenario 1: Luminarias al 100% de capacidad y temperatura de color 6500 K en el horario de 7:00 am a 11:00 am.

Escenario 2: Luminarias al 70% de capacidad y temperatura de color 4000 K en el horario de 12:00 pm a 5:00 pm.

Escenario 3: Luminarias al 50% de capacidad y temperatura de color de 2700 K en el horario de 6:00 pm a 7:00 pm.

Adicionalmente, se consideran dos periodos de transición en donde la iluminación del sistema varia gradualmente según el requerimiento del siguiente escenario de iluminación. Los periodos de transición son de 11:00 am a 12:00 pm y de 5:00 pm a 6:00 pm.

Figura 40

Escenario 1, 6500 K, 100% capacidad

Nota: Elaboración propia

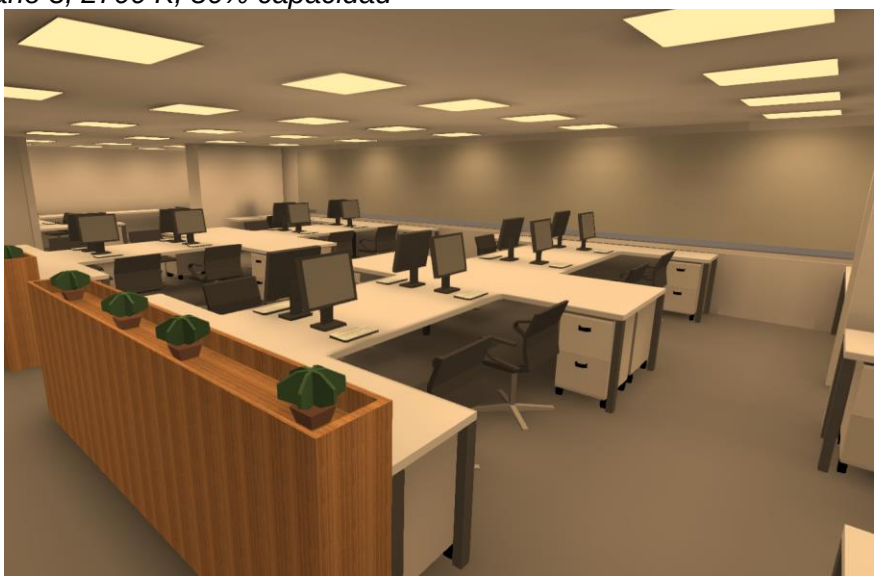
Figura 41

Escenario 2, 4000 K, 70% capacidad

Nota: Elaboración propia

Figura 42

Escenario 3, 2700 K, 50% capacidad



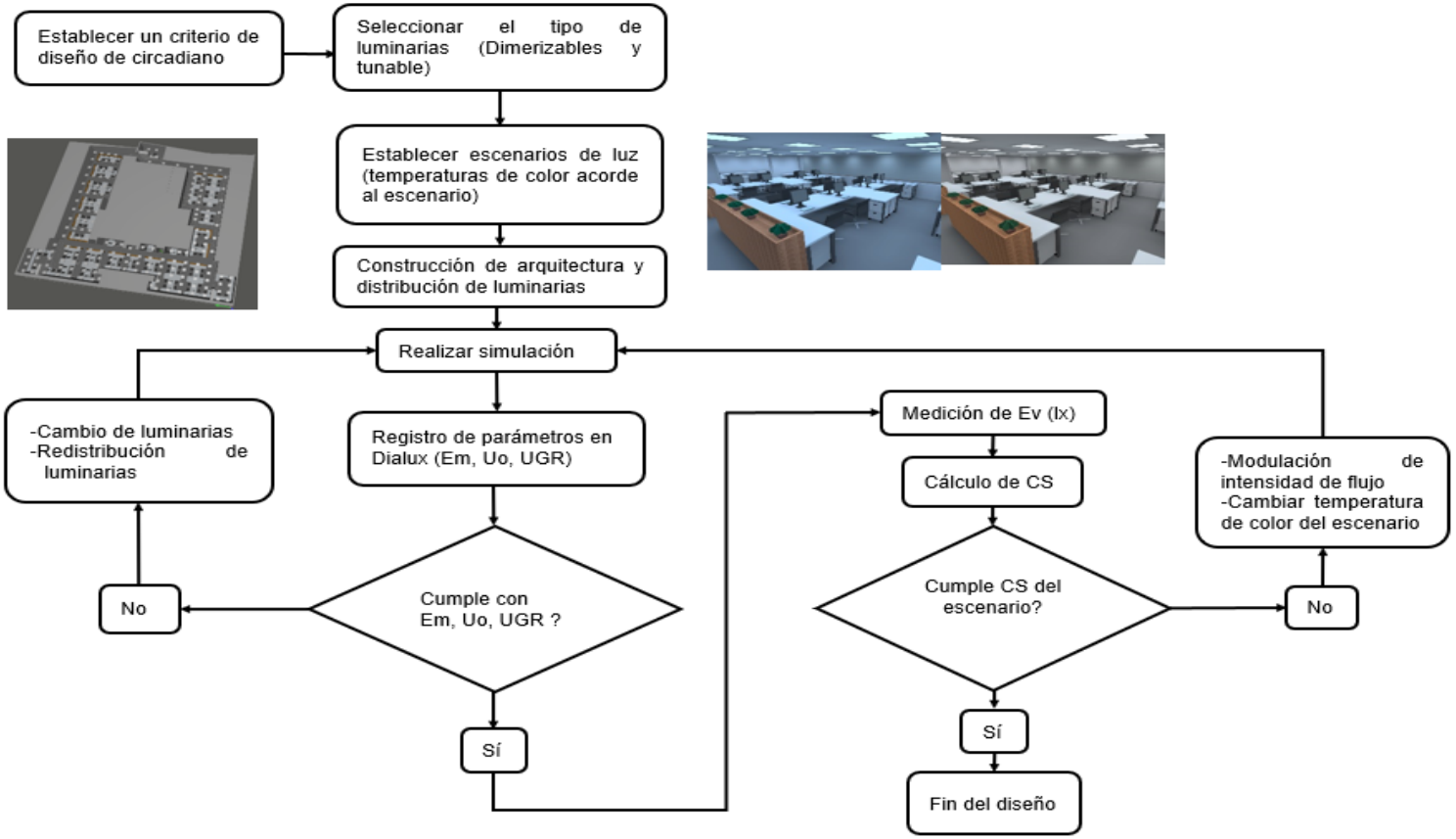
Nota: Elaboración propia

Para el cálculo de los parámetros requeridos para validar el modelo de iluminación se usa la metodología propuesta en 5.3.4.

5.3.4 Metodología para el diseño

Figura 43

Diagrama de flujo para el desarrollo del diseño iluminación



Nota: Elaboración propia

Las Tabla 15, Tabla 17 y Tabla 19 muestran los resultados de iluminancia promedio mantenida (E_m), uniformidad (U_o) y deslumbramientos obtenidos en los escenarios planteados en 5.3.3.

Las Tabla 16, Tabla 18 y Tabla 20 muestran los valores de estímulo circadiano obtenidos en los escritorios de acuerdo con la Figura 31.

Tabla 15

Resultados de simulación de estaciones de trabajo del escenario 1

Ubicación	6500 K, 100% (7:00 am -11:00 am)		
	E_m≥500 lx	**U_o≥0.6**	**UGR≤19**
Estación de trabajo 1	760	0.84	16.90
Estación de trabajo 2	722	0.80	17.20
Estación de trabajo 3	715	0.81	17.40
Estación de trabajo 4	698	0.83	17.30
Estación de trabajo 5	662	0.67	17.70
Estación de trabajo 6	745	0.80	17.30
Estación de trabajo 7	712	0.73	17.00
Estación de trabajo 8	748	0.74	17.30
Estación de trabajo 9	760	0.86	17.40
Estación de trabajo 10	752	0.86	17.70
Estación de trabajo 11	723	0.81	17.80
Estación de trabajo 12	695	0.70	18.00
Estación de trabajo 13	759	0.79	17.70
Estación de trabajo 14	728	0.76	17.60
Estación de trabajo 15	751	0.73	16.80
Estación de trabajo 16	708	0.60	17.40
Estación de trabajo 17	706	0.80	17.90
Estación de trabajo 18	689	0.79	17.80
Estación de trabajo 19	628	0.86	17.60
Estación de trabajo 20	636	0.78	17.40
Estación de trabajo 21	648	0.75	18.00
Estación de trabajo 22	747	0.80	16.80
Estación de trabajo 23	720	0.87	16.50
Estación de trabajo 24	716	0.81	18.10

Nota: Elaboración propia

Tabla 16

Resultados de estímulo circadiano (CS) del escenario 1

Ubicación	6500 K, 100% (7:00 am -11:00 am)	
	E_v (lx)	CS
Escritorio 1	291	0.392
Escritorio 2	295	0.395
Escritorio 3	301	0.399
Escritorio 4	345	0.425
Escritorio 5	349	0.427
Escritorio 6	366	0.436
Escritorio 7	393	0.449
Escritorio 8	393	0.449
Escritorio 9	393	0.449
Escritorio 10	394	0.45
Escritorio 11	394	0.45
Escritorio 12	394	0.45
Escritorio 13	395	0.45
Escritorio 14	395	0.45
Escritorio 15	410	0.457
Escritorio 16	414	0.458
Escritorio 17	414	0.458
Escritorio 18	414	0.458
Escritorio 19	421	0.461
Escritorio 20	421	0.461

Nota: Elaboración propia

El cálculo del estímulo circadiano se realizó de manera similar al procedimiento mostrado en 5.1.6.2, con la diferencia de que los valores de la iluminancia vertical (E_v) se obtuvieron a partir de la simulación en el software Dialux evo.

El cálculo se realizó de manera iterativa, según lo indicado en la metodología de diseño propuesta en 5.3.4, hasta obtener los valores que cumplan con el criterio de diseño de iluminación circadiana indicado en Tabla 13 y a su vez cumplir con los requerimientos de la Norma Técnica .010 del RNE. La disposición de las luminarias del diseño se encuentra en el

Tabla 17

Resultados de simulación de estaciones de trabajo del escenario 2

Ubicación	4000 K, 70% (12:00 pm – 5:00 pm)		
	$E_m \geq 500$ lx	$U_o \geq 0.6$	UGR≤19
Estación de trabajo 1	596	0.84	15.60
Estación de trabajo 2	562	0.80	15.90
Estación de trabajo 3	556	0.81	16.20
Estación de trabajo 4	541	0.83	16.10
Estación de trabajo 5	509	0.67	16.40
Estación de trabajo 6	583	0.80	16.00
Estación de trabajo 7	553	0.73	15.80
Estación de trabajo 8	585	0.74	16.10
Estación de trabajo 9	595	0.86	16.20
Estación de trabajo 10	588	0.86	16.50
Estación de trabajo 11	563	0.81	16.60
Estación de trabajo 12	538	0.70	16.80
Estación de trabajo 13	594	0.79	16.40
Estación de trabajo 14	567	0.77	16.40
Estación de trabajo 15	587	0.73	15.50
Estación de trabajo 16	550	0.60	16.20
Estación de trabajo 17	548	0.80	16.70
Estación de trabajo 18	518	0.79	16.50
Estación de trabajo 19	536	0.86	16.40
Estación de trabajo 20	513	0.78	16.20
Estación de trabajo 21	502	0.75	16.80
Estación de trabajo 22	583	0.80	15.60
Estación de trabajo 23	561	0.87	15.20
Estación de trabajo 24	557	0.81	16.90

Nota: Elaboración propia

Tabla 18

Resultados de estímulo circadiano (CS) del escenario 2

Ubicación	4000 K, 70% (12:00 pm a 5:00 pm)	
	E_v (lx)	CS
Escritorio 1	239	0.2
Escritorio 2	243	0.2
Escritorio 3	247	0.202
Escritorio 4	284	0.225
Escritorio 5	288	0.228
Escritorio 6	302	0.236
Escritorio 7	324	0.248
Escritorio 8	324	0.248
Escritorio 9	324	0.248
Escritorio 10	324	0.248
Escritorio 11	324	0.248
Escritorio 12	324	0.248
Escritorio 13	325	0.249
Escritorio 14	325	0.249
Escritorio 15	337	0.255
Escritorio 16	341	0.257
Escritorio 17	341	0.257
Escritorio 18	341	0.257
Escritorio 19	346	0.26
Escritorio 20	347	0.261

Nota: Elaboración propia

Tabla 19

Resultados de simulación de estaciones de trabajo del escenario 3

Ubicación	2700 K, 50% (6:00 pm a 7:00 pm)		
	$E_m \geq 500$ lx	$U_o \geq 0.6$	UGR≤19
Estación de trabajo 1	424	0.83	14.6
Estación de trabajo 2	402	0.80	14.7
Estación de trabajo 3	397	0.81	15.0
Estación de trabajo 4	386	0.83	14.8
Estación de trabajo 5	363	0.67	15.4
Estación de trabajo 6	415	0.80	14.8
Estación de trabajo 7	394	0.73	14.6
Estación de trabajo 8	417	0.73	14.8
Estación de trabajo 9	425	0.86	15.0
Estación de trabajo 10	419	0.86	15.4

Ubicación	2700 K, 50% (6:00 pm a 7:00 pm)		
	$E_m \geq 500$ lx	$U_o \geq 0.6$	UGR≤19
Estación de trabajo 11	400	0.81	15.5
Estación de trabajo 12	381	0.68	16.0
Estación de trabajo 13	425	0.79	15.4
Estación de trabajo 14	406	0.76	15.3
Estación de trabajo 15	420	0.74	14.4
Estación de trabajo 16	392	0.60	15.0
Estación de trabajo 17	379	0.78	15.6
Estación de trabajo 18	383	0.78	15.4
Estación de trabajo 19	367	0.84	15.2
Estación de trabajo 20	354	0.82	14.9
Estación de trabajo 21	361	0.80	15.8
Estación de trabajo 22	416	0.80	14.3
Estación de trabajo 23	399	0.87	14.1
Estación de trabajo 24	394	0.79	15.8

Nota: Elaboración propia

Tabla 20

Resultados de estímulo circadiano (CS) del escenario 3

Ubicación	2700 K, 50% (6:00 pm a 7:00 pm)	
	E_v (lx)	CS
Escritorio 1	191	0.151
Escritorio 2	197	0.155
Escritorio 3	200	0.157
Escritorio 4	206	0.161
Escritorio 5	209	0.163
Escritorio 6	215	0.167
Escritorio 7	229	0.176
Escritorio 8	229	0.176
Escritorio 9	229	0.176
Escritorio 10	230	0.176
Escritorio 11	230	0.176
Escritorio 12	230	0.176
Escritorio 13	231	0.177
Escritorio 14	231	0.177
Escritorio 15	237	0.181
Escritorio 16	238	0.181
Escritorio 17	243	0.184
Escritorio 18	243	0.184
Escritorio 19	243	0.184

Ubicación	2700 K, 50% (6:00 pm a 7:00 pm)	
	E_v (lx)	CS
Escritorio 20	247	0.187

Nota: Elaboración propia

Capítulo VI Análisis y discusión de resultados

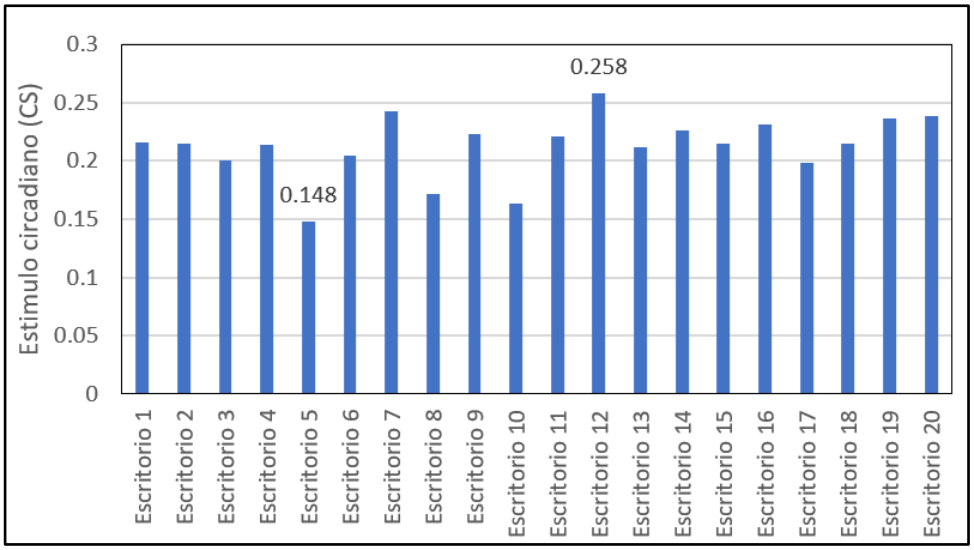
En este capítulo se desarrolla el análisis y discusión de los resultados de la investigación en base a las mediciones realizadas en la oficina del piso 8 de la Torre Javier Prado y la comparación de los escenarios de iluminación planteados en el diseño para la evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueva el bienestar en una oficina, en base a la Guía de Diseño UL 24480 y la normativa local.

6.1 Análisis de los resultados

6.1.1 Estímulo circadiano actual en oficinas del piso 8

Figura 44

Estimulo circadiano actual en la oficina



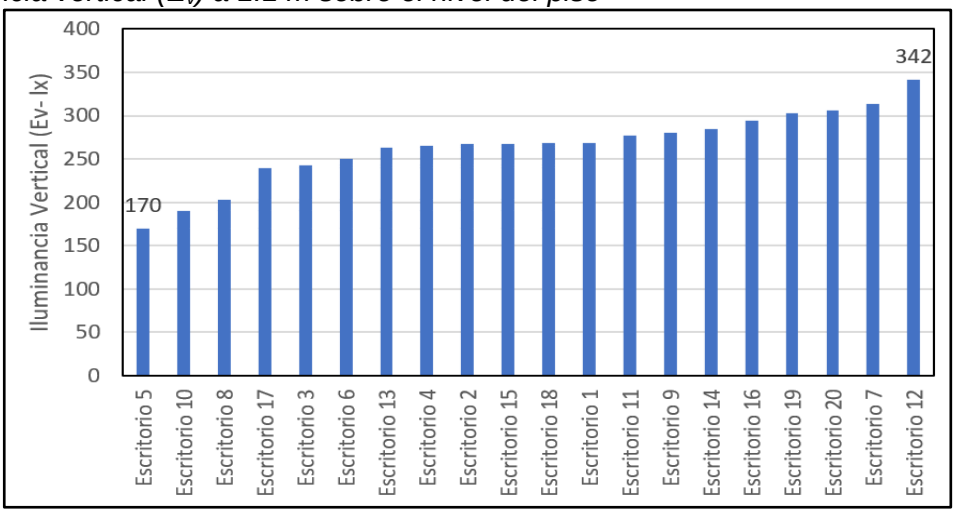
Nota: Elaboración propia

El estímulo circadiano que perciben actualmente los trabajadores varia en un rango de 0.148 a 0.258, lo cual está por debajo del nivel mínimo requerido (CS≥0.3) para promover la sincronización del ritmo circadiano tomando en cuenta que la medición se realizó en el horario de 10:00 am a 11:00 am.

Por otro lado, la iluminancia vertical percibida por los trabajadores a 1.1 m está el rango de 170 a 342 lx, estos niveles de iluminancia en conjunto con la distribución espectral de una luminaria comercial de 4000 K no serían suficiente para alcanzar el estímulo circadiano requerido en horas de la mañana según la Guía de Diseño UL 244880.

Figura 45

Iluminancia vertical (E_v) a 1.1 m sobre el nivel del piso



Nota: Elaboración propia

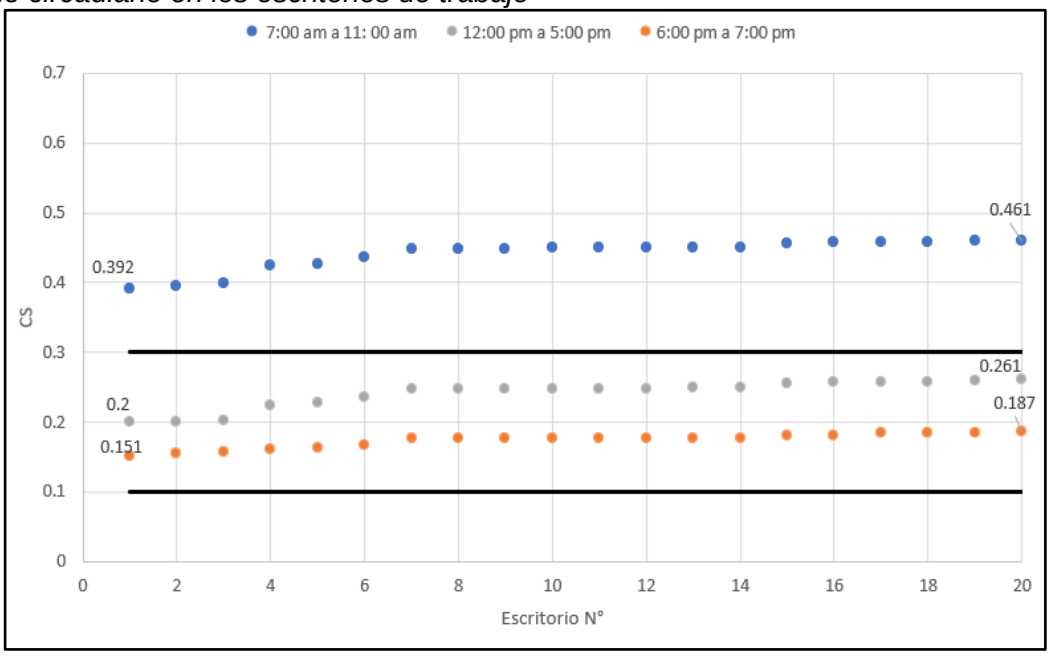
6.1.2 Análisis de los escenarios de iluminación

En esta sección se analizará la variación de los parámetros principales a través de los escenarios y se determinará si el diseño de iluminación cumple técnicamente con la normativa local.

6.1.2.1 Estimulo circadiano

Figura 46

Estimulo circadiano en los escritorios de trabajo



Nota: Elaboración propia

De la gráfica se observa que el estímulo circadiano en los escritorios de trabajo es mayor que 0.3 para el horario establecido de (7:00 am a 11:00 am) cumpliendo con el criterio establecido para el primer escenario.

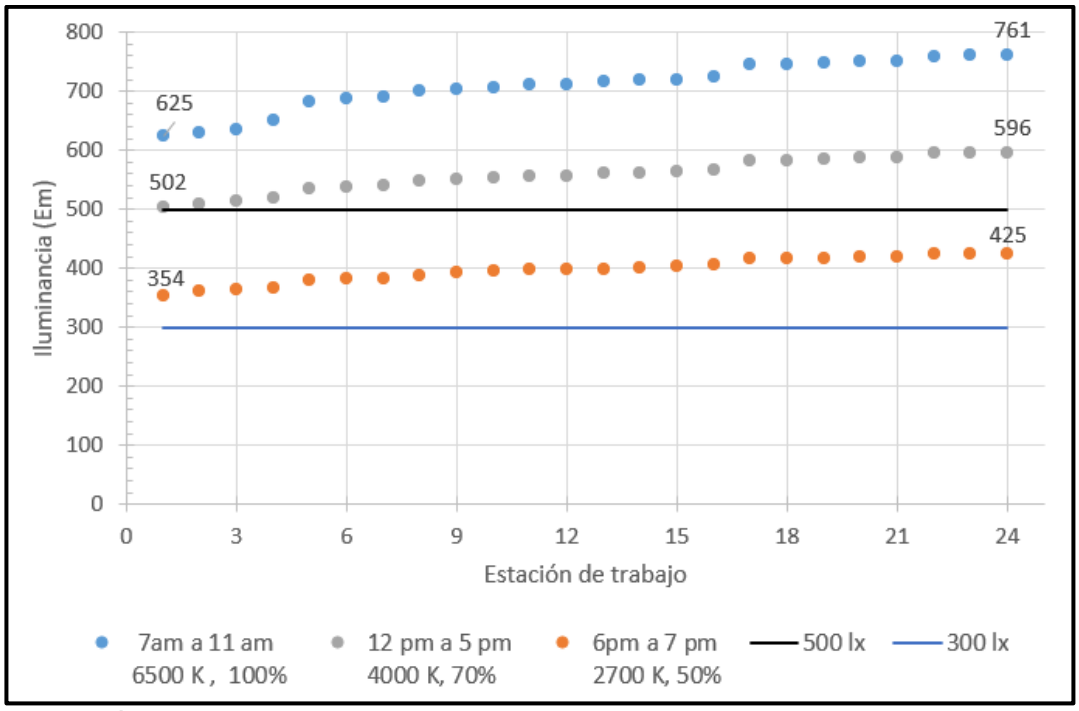
En la tarde se tienen 2 escenarios, el primero de 12:00 pm a 5:00 pm y el segundo de 6:00 pm a 7:00 pm, para los cuales se estableció un estímulo circadiano de 0.2<CS<0.3 y CS≤0.2 respectivamente. En la gráfica se observa que todos los escenarios cumplen con el criterio de diseño establecido.

6.1.2.2 Iluminancia (E_m)

La Figura 47 muestra la variación de la iluminancia en los 3 escenarios propuestos del diseño.

Figura 47

Variación de la iluminancia promedio en los 3 escenarios



Nota: Elaboración propia

De acuerdo con la figura, se observa que la iluminancia requerida en los escenarios 1 y 2 cumple tanto con la Norma Técnica EM.010 del RNE como con la Norma Básica de Ergonomía. Sin embargo, el escenario 3 no cumple con la norma técnica del RNE, pero sí con la Norma Básica de Ergonomía y Procedimiento de Evaluación de Riesgo

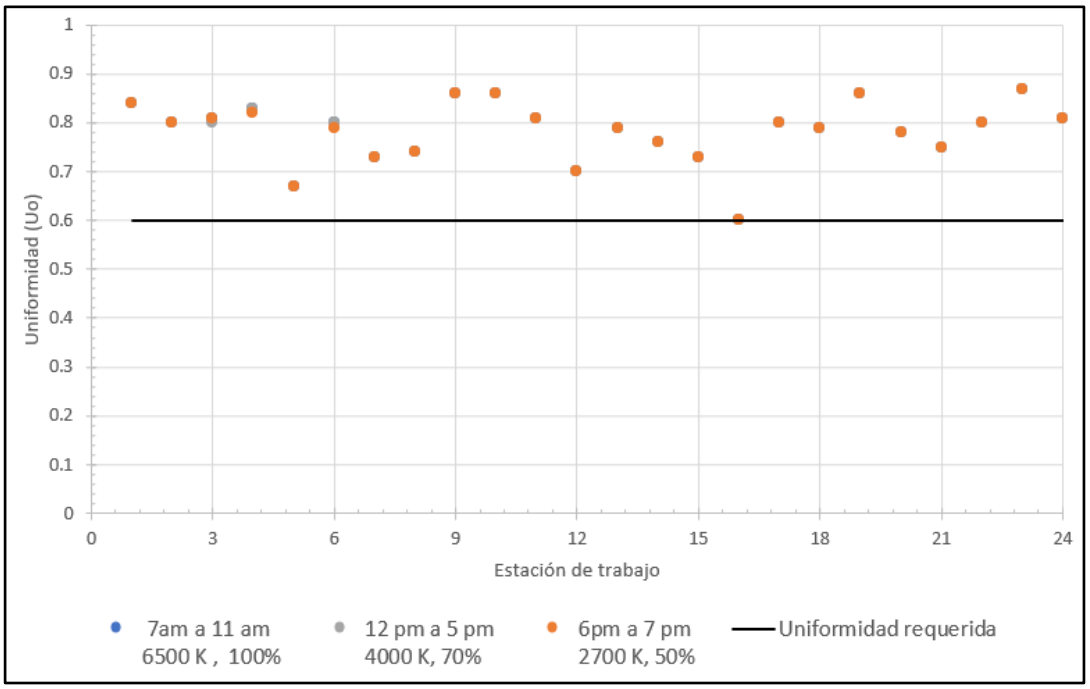
Disergonómico, ya que supera los 300 lux requeridos en oficinas, según lo valores indicados en la Tabla 4.

6.1.2.3 Uniformidad

La uniformidad es constante en los tres escenarios planteados debido a que la distribución de luminarias es constante, por ende, la proporción de iluminancia mínima e iluminancia promedio se mantiene en cada escenario.

Figura 48

Variación de la uniformidad en los 3 escenarios



Nota: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 48, se aprecia que los valores de uniformidad de los tres escenarios superan el valor de 0.6, que es valor mínimo establecido por la normativa local.

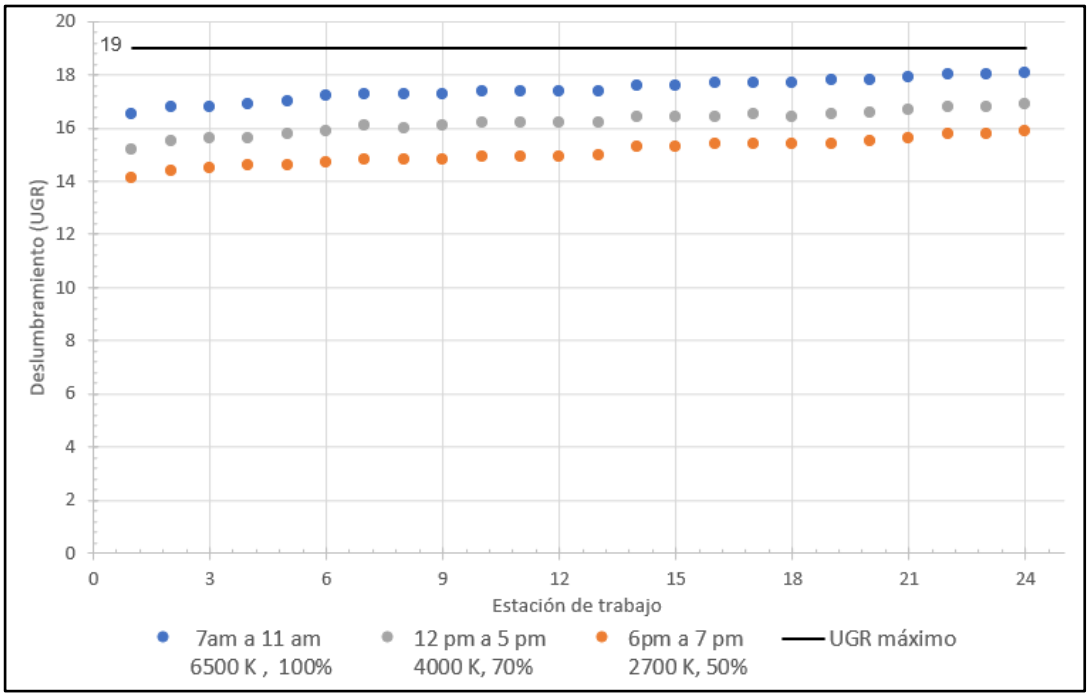
6.1.2.4 Deslumbramiento

Los valores de deslumbramiento se encuentran por debajo de 19, el cual es el máximo permitido para entornos de oficinas según la Norma Técnica EM.010 del RNE.

En la siguiente figura se observa como el deslumbramiento decrece con al pasar del primer escenario al tercer escenario, debido a que las fuentes de iluminación estarían emitiendo un menor flujo y por ello la intensidad percibida sería menor en el último escenario.

Figura 49

Deslumbramiento en los 3 escenarios



Nota: Elaboración propia

De la gráfica se observa que el escenario 1 presenta el mayor nivel de deslumbramiento ya que este escenario contempla que las luminarias emitan el 100% del flujo luminoso, lo cual incrementa el índice de deslumbramiento.

Por otro lado, en los escenarios 2 y 3, los niveles de deslumbramiento disminuyeron ya que estos escenarios requerían un menor flujo luminoso de las luminarias y por ende el resultado es un menor índice de deslumbramiento.

6.1.3 Compatibilidad del diseño de iluminación con la normativa local

La Tabla 21 resume los parámetros evaluados en el diseño de iluminación que promueve el bienestar de las personas.

Tabla 21

Resumen de resultados

Escenario	Criterio UL 24480	CS Promedio	Iluminancia (lux)		Uniformidad	Deslumbramiento
			RNE Em ≥500 lux	NBE Em ≥300 lux	RNE Uo ≥0.6	RNE UGR ≤ 19
Escenario 1 7h - 11 h 6500 K, 100%	CS ≥0.3	0.44	714 ✓	✓	0.78 ✓	17.44 ✓
11 h -12h	transición	-	-	-	-	-
Escenario 2 12h - 17h 4000 K, 70%	0.2<CS≤0.3	0.24	557 ✓	✓	0.78 ✓	16.20 ✓
17h – 18h	transición	-	-	-	-	-
Escenario 3 18h – 19 h 2700 K, 50%	0.1≤CS≤0.2	0.17	397 X	✓	0.78 ✓	15.07✓

Nota: Elaboración propia

Tabla 22

Porcentaje de cumplimiento de la Guía de diseño UL 24480 con la NBE

Normativa	Iluminancia	%Porcentaje
Escenario 1 7h - 11 h	Cumple	100
Escenario 2 12h - 17h	Cumple	100
Escenario 3 18h – 19 h	Cumple	100

Nota: Elaboración propia

Tabla 23

Porcentaje de cumplimiento de la Guía de diseño UL 24480 con la Norma Técnica EM.010

Normativa	Iluminancia	Uniformidad	Deslumbramiento	%Porcentaje
Escenario 1 7h - 11 h	Cumple	Cumple	Cumple	100
Escenario 2 12h - 17h	Cumple	Cumple	Cumple	100
Escenario 3 18h – 19 h	No cumple	Cumple	Cumple	66

Nota: Elaboración propia

De la Tabla 21 y Tabla 22 se observa que todos los escenarios cumplen con los parámetros de iluminancia, uniformidad y deslumbramiento según los requerimientos de la NBE.

De la Tabla 21 y Tabla 23 se observa que los escenarios 1 y 2 cumplen con una adecuada iluminancia, uniformidad y deslumbramiento según Norma Técnica EM.010 del RNE; sin embargo, el escenario 3 cumple parcialmente al no satisfacer la iluminancia mínima indicada en la Norma Técnica EM.010 del RNE (500 lux). Por ello, la Guía de Diseño UL 24480 no sería totalmente compatible con lo indicado en la norma mencionada.

6.1.4 Costo de las luminarias y consumo de energía

6.1.4.1 Costo de luminarias

En condiciones similares de potencia las luminarias con características variables como “Tunable White” son más caras que las luminarias convencionales debido a que para el control de la temperatura de color y la cantidad de flujo emitido se requiere de un dimmer adicional, lo cual encarece el costo de la luminaria. La Tabla 24 muestra precios referenciales de una luminaria con flujo luminoso invariante y una luminaria con flujo luminosos variable. La cantidad de luminarias consideradas es 130.

Tabla 24

Costo referencial de las luminarias

Tipo	Costo unitario ($)	Costo total ($)
Convencional	43.3	5629
Circadiana	55.8	7254

Nota: Elaboración propia en base a [29]

Adicionalmente se debe considerar el sistema de control que realizará el control de todo el sistema de iluminación cuyo costo seria aproximadamente $ 255 según [30].

El costo de una luminaria con características de temperatura de color y flujo luminoso variable es 28% mayor que el costo de una luminaria convencional que no presenta algún tipo de variación en el tiempo de sus características.

El costo total de un sistema de iluminación convencional sería $ 5629 mientras el costo de un sistema de iluminación circadiano sería de $ 7509. Esto sería un 33 % mayor que un sistema convencional.

6.1.4.2 Consumo de energía

El consumo de energía para un sistema de iluminación convencional y el propuesto en la presente tesis se muestra en la Tabla 25 y Tabla 26. Para la estimación del consumo de energía de un sistema de iluminación convencional se consideran el escenario 1 y el escenario 2 como dos casos independientes para su evaluación, ya que estos escenarios cumplían con todos los requisitos establecidos tanto en la Norma Técnica .010 del RNE y la NBE. El escenario 3 se excluye en la comparativa por no cumplir con todos los requisitos exigidos en la Norma Técnica EM.010. Se considera que estos escenarios mantienen los niveles de iluminación en el transcurso del día.

Tabla 25

Consumo de los sistemas de iluminación convencional

	Cantidad de horas	**Potencia (W)**	**Energía kWh**
Escenario 1 07:00 am 7:00 pm	12	28.8	44.93
Escenario 2 7:00 am 7:00 pm	12	20.16	31.45

Nota: Elaboración propia

Tabla 26

Consumo del sistema de iluminación circadiana

	Cantidad de horas ocupadas	**Capacidad**	**Potencia (W)**	**kWh**
Escenario 1 7:00 am a 11:00 am	4	100%	28.8	14.98
Transición	1	85%	24.48	3.18
Escenario 2 12:00 pm a 5:00 pm	4[11]	70%	20.16	10.48
Transición	1	60%	17.28	2.25
Escenario 3 6:00 pm a 7:00 pm	1	50%	14.4	1.87
			Total	32.5

Nota: Elaboración propia

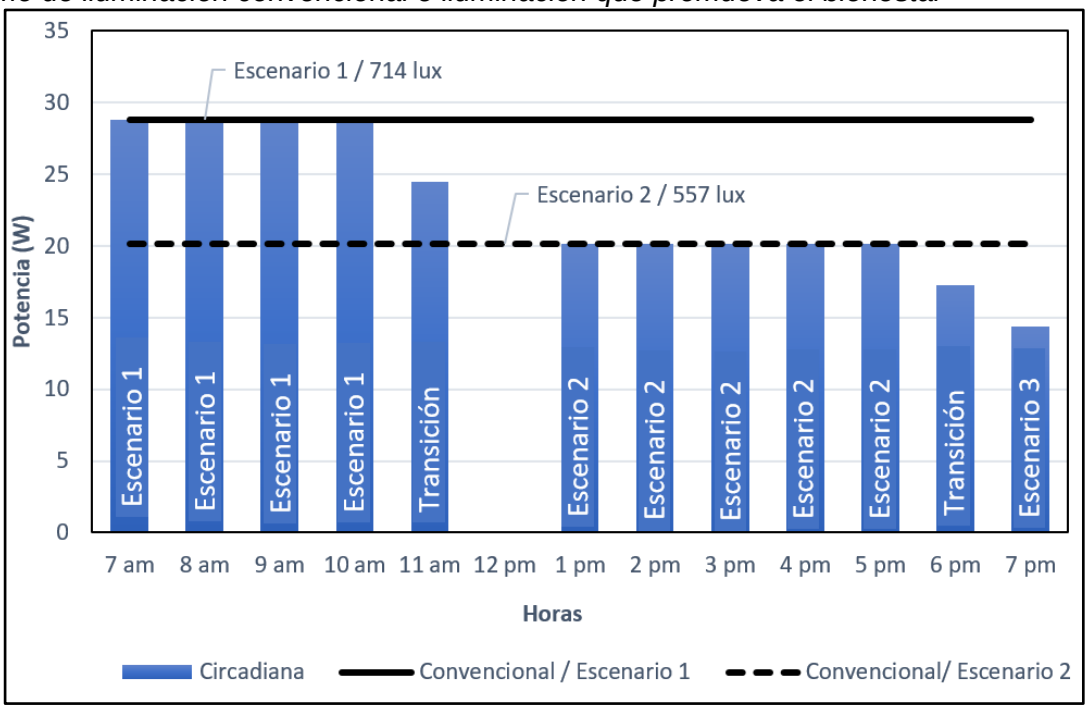
La Figura 50 muestra el consumo de iluminación para un sistema de iluminación circadiana y dos sistemas de iluminación convencional tomando los escenarios 1 y escenario 2 como casos independientes. Estos escenarios presentan niveles de

[11] Se considera solo 4 horas porque el sistema de iluminación se apagaría, mediante su sistema de control, en la hora de almuerzo.

iluminación promedio de 714 lux y 557 lux respectivamente con luminarias cuya potencia se indica en la Tabla 25.

Figura 50

Consumo de iluminación convencional e iluminación que promueva el bienestar



Nota: Elaboración propia

Según la **Figura *1***Figura 50 el consumo de iluminación para un sistema de iluminación circadiana sería 27.5 % menor en comparación con un diseño de iluminación convencional que tenga el nivel de iluminación del escenario 1, por otro lado, el consumo de iluminación para el sistema de iluminación que promueva el bienestar o circadiana sería mayor en un 3.5% comparado con el diseño de un sistema de iluminación convencional del escenario 2.

6.1.5 Puntos de mejora en la normativa local

Aunque la normativa local busca asegurar el bienestar, la seguridad y un rendimiento visual adecuado de las personas mediante la regulación de los parámetros de iluminación, según los resultados de la investigación, se proponen los siguientes aspectos para mejorar, con el objetivo de promover el bienestar en los diseños de iluminación en oficinas.

6.1.5.1 Variabilidad de la luz

La normativa local no contempla algún punto sobre la variabilidad de la luz. La adopción de una iluminación artificial variable tanto en intensidad como en temperatura de color o distribución espectral es clave para poder diseñar una iluminación circadiana en oficinas u otros espacios interiores.

6.1.5.2 Definición de un rango de iluminancia

Actualmente el requerimiento mínimo para oficinas es 300 lux según la Norma Básica de Ergonomía y Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico y 500 lux según la Norma Técnica EM.010 del RNE.

De acuerdo con los resultados de la investigación el diseño de una iluminación que promueve el bienestar de las personas o iluminación circadiana conlleva a variar la intensidad de la luminaria para poder obtener los valores de estímulo circadiano recomendados, lo cual se relaciona a una variación en los niveles de iluminancia a largo del día. Para ello se sugiere definir un rango de iluminancia que permita un buen rendimiento visual en oficinas considerando un valor mínimo que permita tener una visibilidad adecuada y un valor máximo para evitar la posibilidad del deslumbramiento generado por altos niveles de deslumbramiento.

6.2 Contrastación de la hipótesis

a) Hipótesis general: Los resultados de la presente investigación permitieron comprender como integrar la nueva medida, llamada estímulo circadiano (CS), brindada por la Guía de Diseño UL 24480 para diseñar una iluminación que promueva el bienestar de las personas mediante un diseño de iluminación y su evaluación técnica respecto a la normativa local y la Guía de Diseño UL 24480. Esto permitió identificar los puntos de mejora, mencionados en el apartado 6.1.5, de la normativa local para lograr un diseño que brinde un buen rendimiento visual y que a su vez promueva el

bienestar. Por lo tanto, es posible mejorar el diseño de iluminación en oficinas mediante el diseño y la evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueva el bienestar en oficinas en base a la Guía de Diseño UL 24480.

b) Hipótesis especifica 1: De acuerdo a la Tabla 21 y Tabla 22 es posible el diseño de iluminación que promoverá el bienestar de las personas según la “Norma Básica de Ergonomía y Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico”. Se dice que este diseño promueve el bienestar porque cumple con el criterio de diseño indicado por la Guía de Diseño UL 24480, el cual indica la exposición a una iluminación que produzca un estímulo circadiano mayor de 0.3 (CS>0.3) en las mañanas por al menos dos horas.
c) Hipótesis específica 2: Para el diseño de iluminación se usaron 3 escenarios de iluminación, de los cuales en el primer escenario se planteó como criterio obtener un estímulo circadiano mayor de 0.3 por un periodo de 4 horas, lo cual sería suficiente según lo indicado por la Guía de Diseño UL 24480, por lo tanto, es posible diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la Guía de Diseño UL 24480 en oficinas.

Conclusiones

1. El diseño de iluminación, que promueva el bienestar de las personas, es técnicamente viable con la normativa local y la Guía de Diseño UL 24480. De acuerdo con la Tabla 22, el porcentaje de cumplimiento de los requisitos de la "Norma Básica de Ergonomía y Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico" es de un 100%. En el caso del RNE el cumplimiento es parcial, ya que los requisitos se cumplirían totalmente para los escenarios 1 y 2, por otro lado, el escenario 3 cumpliría parcialmente con los requisitos del RNE.
2. El diseño de iluminación en base la Guía de Diseño UL 24480 implica la variación de los parámetros como la iluminancia promedio y deslumbramiento debido a que para esto fue necesario variar las características de la luminaria en cada escenario.
3. Es necesario indicar la variabilidad de la iluminación en la normativa peruana para poder diseñar una iluminación que brinde un rendimiento visual adecuado y promueva la sincronización del ritmo circadiano.
4. El diseño de iluminación que promueva el bienestar de las personas o iluminación circadiana basado en la métrica propuesta por la Guía de Diseño UL 24480, implica un diseño que conlleva un mayor tiempo de diseño debido al mayor número de iteraciones en Dialux, dado que el software no puede realizar el cálculo del estímulo circadiano directamente y este debe ser calculado con los resultados que de iluminancia que proporciona el Dialux a través de la calculadora proporcionada por la Guía de Diseño UL 24480.
5. En base a los resultados de las mediciones, se concluye que el estímulo circadiano percibido por los trabajadores de la oficina del piso 8 de la Torre Javier Prado no es suficiente por las mañanas para promover la sincronización del ritmo circadiano de estos.
6. El costo del sistema de iluminación que promueve el bienestar es más alto debido a la necesidad de incluir controles adicionales, como el dimmer, para regular la

intensidad y temperatura de color. En la presente tesis, el costo de un sistema de iluminación circadiana es un 33% superior, principalmente porque el precio por luminaria es más elevado.

7. El base a la Figura 50 el consumo de energía para el caso en un sistema de iluminación que promueva el bienestar podría generar un ahorro considerable si un sistema de iluminación presentará niveles de iluminación considerablemente superiores a los requeridos por la normativa.

Recomendaciones

1. Se recomienda ampliar el estudio a otros espacios interiores cuya exposición a la luz artificial sea prolongada como: colegios, bibliotecas, hospitales, universidades, etc.
2. En caso de ser posible, se recomienda el uso de un espectrofotómetro, el cual permite realizar mediciones de la distribución espectral de la luz y así cuantificar el estímulo circadiano con una mayor exactitud.
3. Es necesario que los profesionales de iluminación tomen conciencia de que la iluminación no solo tienen impacto en el rendimiento visual de la persona, sino también en el ritmo circadiano de estas, el cual promueve el bienestar de estas y es afectado por la luz ya sea artificial o natural.
4. Es recomendable establecer una iluminación adecuada por la noche en casa especialmente antes de dormir ya que el diseño de la investigación se limita al lugar de trabajo diurno en oficinas en un horario de (7:00 am a 7:00 pm), sin embargo, la luz que percibimos por la noche también puede generar un efecto en el ritmo circadiano.
5. En base al diseño de iluminación propuesto es recomendable una iluminación con temperaturas de color frías por la mañana, neutras o cálidas por la tarde. Adicionalmente es importante regular la iluminación que emite la fuente de luz.

Referencias

[1] Underwrite Laboratories, UL 24480, «Design Guideline for Promoting Circadian Entrainment with Light for Day-Active People,» 2019.

[2] N. Juliana y N. A. S. Mohd Azmi, «Consequences of Circadian Disruption in Shift Workers On Chrononutrition and their Psychosocial Well Being,» 2020.

[3] Society of Light and Lighting, The SLL Lighthing Hanbook, 2009.

[4] H.E.Cubides, Diseño de una herramienta de cálculo de iluminación basada en el estímulo de los ritmos circadianos, tesis de maestría, 2022.

[5] E. A. Beltrán Ramírez y R. D. Ortiz Anaya, Diseño de iluminación de un piso de un hospital aplicando el estándar WELL, 2023.

[6] C. Garrido y M. B. Piderit, «Factores de diseño de la iluminación que intervienen en el estímulo circadiano en oficinas,» *AUS [Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad],* 2020.

[7] M. M. Granifo, Intervención lumínica experimental que favorezca la sincronización del ciclo circadiano en el ambiente de aprendizaje, 2021.

[8] M. Rossi, Circadian Lighting Desing in the LED Era, 2019.

[9] H. R. Martin, Una mirada a la naturaleza de la luz y el espéctro eléctromágnetico, 2013.

[10] Pulso Académico, «http://www.cch-naucalpan.unam.mx/v2018/pulsoacadp.php,» UNAM, 2021. [En línea]. [Último acceso: 05 2023].

[11] «SWEETESTHOME,» 2023. [En línea]. Available: https://www.sweetesthome.mx/luxometro/.

[12] HOPOOCOLOR. [En línea]. Available: https://www.hopoocolor.com/es/product/detail/ppfd-meter.html.

[13] «Lighting Reserarch Center,» [En línea]. Available: https://www.lrc.rpi.edu/healthyliving/index.html#section-whatIsCircadianLighting. [Último acceso: 2023].

[14] Á. Belmonte, «UNPROFESOR,» [En línea]. Available: https://www.unprofesor.com/ciencias-naturales/anatomia-del-ojo-humano-3256.html#anchor_4.

[15] J. A. Paz, Manual de iluminación interior, 2006.

[16] «Luminotecnia.Dispositivos para alumbrado,» [En línea]. Available: https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/844861173X.pdf. [Último acceso: Junio 2023].

[17] «Guia sobre tecnología Led en alumbrado,» 2015. [En línea]. Available: https://www.fenercom.com/publicacion/guia-sobre-tecnologia-led-en-el-alumbrado/.

[18] «Cooper LIghting Solutions,» 2022. [En línea]. Available: https://www.cooperlighting.com/api/assets/v1/file/CLS/content/053b278bfcc447348638ad3f014a0247/cooper-lighting-vividtune-brochure.

[19] «ABB,» [En línea]. Available: https://library.e.abb.com/public/b9f165b7588642f18651b7b786c53ddc/DGS_X6411_TD_ES_V1-0_2CDC507165D0701.pdf?x-sign=doyiGtimpAz+rlQnyuWvbPd+5hSQziwY7OivALgUoReFyBoDA7TUfgrLYS96Kbsl.

[20] «SINCRO,» [En línea]. Available: https://www.bysincro.com/iluminacion-interiores-viviendas/.

[21] W. v. B. y. A. Rouhana, Fundamentos sobre la generación de la luz y el alumbrado, 2011.

[22] UNE-EN 12464-1, «Luz e iluminación. Iluminación de los lugares de trabajo.Parte 1: Lugares de trabajo en interiores,» 2022.

[23] T. Woo, «Unitop,» [En línea]. Available: https://www.unitopledstrip.com/es/what-is-cri-and-why-is-it-important-to-led-lighting/.

[24] L. a. H. Researcher, «https://cscalc.light-health.org/,» 2023. [En línea].

[25] Gobierno del Perú, «NORMA BÁSICA DE ERGONOMÍA Y DE PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE RIESGO,» 2008. [En línea]. Available: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/472127/Anexo_1-Norma_B%C3%A1sica_de_Ergonom%C3%ADa....pdf?v=1578090278.

[26] NORMA TÉCNICA EM.010, « INSTALACIONES ELÉCTRICAS INTERIORES DEL REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES,» 2019.

[27] Organización Mundial de la Salud, «Lograr el bienestar: Un marco mundial para integrar el bienestar en la salud,» 2022.

[28] R. Hernandez Sampieri, Metodología de la investigación, 2014.

[29] «SODIMAC,» [En línea]. Available: https://sodimac.falabella.com.pe/sodimac-pe/product/113317057/Panel-LED-36W-para-Empotrar-60x60cm-Luz-Fria/113317058?exp=sodimac&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA1fqrBhA1EiwAMU5m_0SnwZSxVmvKxn_q0ViOYhhfL_2YHCeOj5HfCEq6WBbh342NuAvSnhoC25kQAvD_BwE&kid=shopp57so&p.

[30] «DOMOTIGEMSA,» [En línea]. Available: https://www.domotigemsa.es/bes-knx/40024-dalik-brd3-gateway-knx-dali-1-16-64-formato-din.html.

ANEXOS

Anexo 1 Matriz de consistencia: 1

Anexo 2 Ficha técnica de luxómetro digital usado en la investigación 2

Anexo 3 Plano de arquitectura de la oficina del piso 8 de la Torre Javier Prado.....3

Anexo 4 Plano de disposición de luminarias de la oficina del piso 8 de la Torre Javier Prado.....4

Anexo 5 Modelo de la oficina en Dialux evo 5

Anexo 6 Características de la luminaria Cooper Lighting seleccionada 6

Anexo 1

Matriz de consistencia:

“Evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueve el bienestar en oficinas en base a la Guía de Diseño UL 24480”

Problemas	**Objetivos**	**Hipótesis**	**Variables y=f(x)**	**Diseño de la Investigación**
Problema General	**Objetivo General**	**Hipótesis General**	**Variable independiente**	**Tipo** Mixta **Diseño** No experimental **Nivel** Aplicativo
¿Como se puede mejorar el diseño iluminación en oficinas para promover el bienestar en base a la Guía de Diseño UL 24480?	Mejorar el diseño de iluminación en oficinas mediante el diseño y evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación para promover el bienestar en base a la Guía de Diseño UL 24480.	Es posible mejorar el diseño de iluminación en oficinas mediante el diseño y evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueva el bienestar en oficinas en base a la Guía de Diseño UL 24480.	Evaluación de la viabilidad técnica	
Problemas específicos	**Objetivos Específicos**	**Hipótesis Específicas**	**Variable dependiente**	
¿Es posible diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la normativa local en oficinas?	Diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la normativa local en oficinas.	Es posible diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la normativa local en oficinas.	Diseño de iluminación	
¿Es posible diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la Guía de diseño UL 24480 en oficinas?	Diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la Guía de Diseño UL 24480 en oficinas.	Es posible diseñar un diseño de iluminación que promueve el bienestar en base a los requisitos de la Guía de Diseño UL 24480 en oficinas.		

Anexo 2

Ficha técnica de luxómetro digital usado en la investigación

CÓDIGO:
UT383

FICHA TÉCNICA

UNI-T UT383 Mini 200.000 LUX Luxómetro Digital luminancia Lux Fc prueba Max Min iluminómetros fotómetro envío libre. Equipado con tecnología de detección fotoeléctrica, que puede representar efectivamente la intensidad de la luz con señales eléctricas. Es liviano, compacto, ergonómico y fácil de usar.

***Nombre:** Mini medidor de luz	**Alimentación:** 1.5V(AAA)x3
Alto (cm): 16.0 cm	**Ancho (cm):** 5.0 cm
Ancho (mm): 50 mm	**Auto apagado:** Si
Capacidad: Equipado con tecnología de detección fotoeléctrica, que puede representar efectivamente la intensidad de la luz con señales eléctricas	**Características:** Es liviano, compacto, ergonómico y fácil de usar
Certificaciones: CE, RoHS, ISO 9001	**Código:** UT383
Código de producto: UT383	**Color:** Negro/Rojo
Consumo eléctrico: En uso mA ≤30mA; Apagado uA ≤10uA	**Garantía:** 2 años
Grupo del Calibrador: Digital	**Humedad Rango:** ≤80%RH
Incluye: (3) Baterías AAA	**Indicación de batería baja:** Si
Luminancia Exactitud: ±4%rdg+5dgts; ±5%rdg+8dgts; Conversión de bits: FC = LUX / 10.76 La precisión del FC no necesita ser verificada. Se calcula mediante la fórmula. Ingrese el mismo valor y convierta las unidades para verificar si cumple con FC = LUX / 10.76.	**Luminancia Rango:** 0□9999Lux; ≥10000Lux; 0□9999Fc; ≥10000Fc
Luminancia Resolucion: 1Lux; 10Lux; 1Fc; 10Fc	**Material:** Plástico, Metal
Medida: 160x50x28mm	**Para Uso:** Monitorear la intensidad de la luz en hogares, oficinas etc.
Peso (Kg): 0.17 Kg	**Presentación:** Caja a Color
Profundidad (cm): 2.8 cm	**Rango:** Rango de medición 0 a 200, 000; LUX
Tasa de muestreo: 0 a 9999Fc; 1Fc	**Temperatura C:** 0 a 40 grados
Temperatura y humedad de almacenamiento: - 20 a 60 grados Centigrados; ≤ 75%RH	**Tipo:** Medidores y Niveles Láser
Usos: Profesional	**Voltaje:** 1.5V

Anexo 3

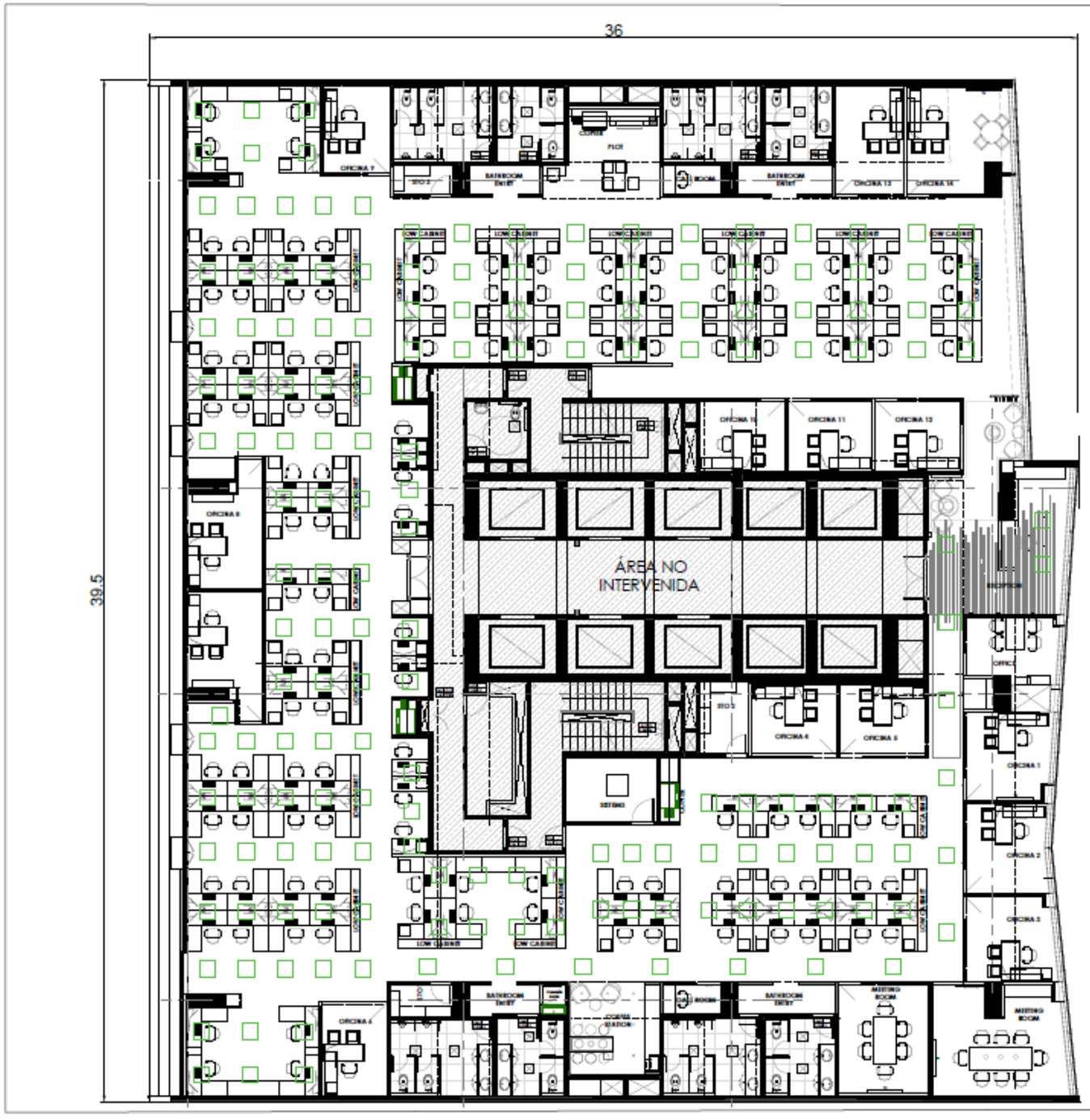
Plano de arquitectura de la oficina del piso 8 de la Torre Javier Prado

Nota:
Dimensiones en metros

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Tesis "Evaluación de la viabilidad técnica del diseño de iluminación que promueve el bienestar en oficinas en base a la Guía de Diseño UL 24480"	
Plano PLANO DE ARQUITECTURA DE LUMINARIAS DE LA OFICINA DEL PISO 8 DE LA TORRE JAVIER PRADO	
Elaborado: Bach. Ivan Prado Cienfuegos	Escala: 1 / 50

Anexo 4

Plano de disposición de luminarias de la oficina del piso 8 de la Torre Javier Prado



Nota:
Dimensiones en metros

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Tesis "Evaluación de la viabilidad técnica del diseño de iluminación que promueve el bienestar en oficinas en base a la Guía de Diseño UL 24480"	
Plano PLANO DE DISPOSICIÓN DE LUMINARIAS DE LA OFICINA DEL PISO 8 DE LA TORRE JAVIER PRADO	
Elaborado: Bach. Ivan Prado Cienfuegos	Escala: 1 / 50

Anexo 5

Modelo de la oficina en Dialux evo

Anexo 6

Características de la luminaria Cooper Lighting seleccionada

Domestic Preferences [1]	Rating	Series	Air	Lumen Level		Efficacy	Shielding	Voltage [9]	Options
[Blank]=Standard **BAA**=Buy American Act **TAA**=Trade Agreements Act	**[Blank]**=Standard **ATW-SW4**= Chicago Rated	**22CZ2**=2x2 Cruze ST	**[Blank]**=Standard **A**=Air (Vented) [2]	**20**=2000 Lumens **24**=2400 Lumens **29**=2900 Lumens [8] **32**=3200 Lumens [7] **35**=3500 Lumens [8] **39**=3900 Lumens **44**=4400 Lumens **50**=5000 Lumens [6] **55**=5500 Lumens [6] **60**=6000 Lumens [6] **65**=6500 Lumens [6]	**70**=7000 Lumens [6] **75**=7500 Lumens [6] **80**=8000 Lumens [6] **85**=8500 Lumens [6] **90**=9000 Lumens [6] **95**=9500 Lumens [6] **100**=10000 Lumens [6] **110**=11000 Lumens [6]	**[Blank]**=Standard Efficacy [4, 5] **HE**=High Efficacy [5] **VHE**=Very High Efficacy [6]	**[Blank]**=Ribbed Frosted Acrylic Lens (standard) **S**=Smooth Frosted Acrylic Lens **HRP**=High-Efficiency Round Perf Inlay **SQR**=Square Ribbed Frosted Acrylic Lens	**UNV**=Universal Voltage 120-277 **347V**=347 Volt **48V**=48 Volt Low-voltage (Class 2) [C]	**GL**=Single Element Fuse **GM**=Double Element Fuse **PAF**=Painted After Fabrication
Notes (1) Only product configurations with these designated prefixes are built to be compliant with the Buy American Act of 1933 (BAA) or Trade Agreements Act of 1979 (TAA), respectively. Please refer to DOMESTIC PREFERENCES website for more information. Components shipped separately may be separately analyzed under domestic preference requirements.			**Notes** (2) Air version is intended for air return through plenum. See air return data table for air flow volumes. Air option not available with ATW-SW4. Air requires "PAF" option.	**Notes** (4) White tuning not available with this model. (5) Available up to 4400 lumens. (6) Available with CD and HCD drivers only. (7) Only available in Standard Efficacy. (8) Not available in Standard Efficacy.				**Notes** (9) Products also available in non-US voltages and frequencies for international markets. (C) Consult WaveLinx Low-Voltage or DLVP system pages for additional details and compatibility.	

Emergency Options	CRI/CCT	Flex
[Blank]=No emergency **EL7W**=7-watt 120V-277V emergency battery pack [10] **EL10W**=10-watt 120V-277V emergency battery pack [10] **EL14W**=14-watt 120V-277V emergency battery pack [10] **EL10WSD**=10W emergency battery pack with self-diagnostic installed [10], [12] **EL14WSD**=14W emergency battery pack with self-diagnostic installed [10], [12] **ELV7W**=Low-voltage system, 7-watt emergency battery pack [C] **ELV14W**=Low-voltage system, 14-watt emergency battery pack [C] **ETRD**=Emergency Transfer Relay with dimming control [11] **RRU**=LVS Controls Emergency Transfer Relay with dimming control [11] **UEL7W**=UL924 Listed luminaire, 7-watt, 120V-277V emergency battery pack [10] **UEL14W**=UL924 Listed luminaire, 14-watt 120V-277V emergency battery pack [10] **UEL10WSD**=Bodine 10W emergency battery pack with self diagnostic installed [10], [13] **UETRD**=UL924 Listed luminaire, Emergency Transfer Relay with dimming control [11] **URRU**=UL924 Listed luminaire, LVS Controls Emergency Transfer Relay with dimming control [11]	**L830**=80CRI, 3000K **L835**=80CRI, 3500K **L840**=80CRI, 4000K **L850**=80CRI, 5000K **L930**=90CRI, 3000K **L935**=90CRI, 3500K **L940**=90CRI, 4000K **L950**=90CRI, 5000K **L83050**=80CRI 3000K-5000K White Tuning [14] **L93050**=90CRI 3000K-5000K White Tuning [14] **L82765**=80CRI 2700K-6500K White Tuning [14] **L92765**=90CRI 2700K-6500K White Tuning [14]	**[Blank]**=No Flex **A3/8-4/18GDIM**=3/8" Flex with 0-10V Dimming Leads **A3/8-2/18G**=3/8" Flex with line and common **A3/8-5/18GDIM**=Flex with 0-10V Dimming leads and Blue for alternate wiring. See below for details.
Notes (10) Factory installed with integral test switch/indicator/laser test. For approximate delivered lumens multiply the lumens per watt of the desired fixture by the wattage of the emergency battery pack (100 lm/W x 7=700 lumens). IES-format photometry for luminaire under emergency operation available. Battery option increases total height by 1 inch. (11) Used to bypass local control during outage. Must be used in conjunction with UL 1008 device (provided by others). Devices are universal voltage (UNV). 347 not available. (12) EL10WSD and EL14WSD not available with 347V. (13) UEL10WSD not available with 347V. (C) Consult WaveLinx Low-Voltage or DLVP system pages for additional details and compatibility.	**Notes** (14) White tuning provides correlated color temperatures (CCT) between 3000K (warm) to 5000K (cool) or 2700K (warm) to 6500K (cool). Must be used in conjunction with W2A driver only. Must be used with two (2) 10V dimming control channels, 1 color, 1 intensity. May be combined with Wavelinx sensor control systems only.	**Flexible Metal Conduit Options** Flex options available for 0-10V dimming control, DALI dimming control, emergency and night light functions. 72-inch factory-installed and pre-wired to driver, fitted to luminaire housing access plate with 90° enclosed FMC connector. Not all options may be combined and installation ratings vary by type. See online configurator for all flex options. **A3/8-4/18GDIM series notes:** Factory installed dimming option 3/8" flexible metal conduit with 2-#18 power and ground wires and 2-#18 UL-listed jacketed 0-10V +/- control wires. Meets UL 66, 83, 1479, 1569, 1581, 2556. NEC® 250.118, 300.22(C), 392, 396, 330, 501, 502, 503, 530, 504, 505, 518, 520, 530, 645, 72; Federal Specification A-A-59544 (formerly J-C-30B); all applicable OSHA and HUD Requirements. UL Classified 1-, 2-, and 3-hour through penetration with applicable fire stop product (not included). May be surface mounted, fished and/or embedded in plaster. Cable tray and approved raceway rated, install per NEC®; Environmental Air-Handling Space Installation per NEC® 300.22(C).

Metalux — 22CZ2 LED

Driver Type	Number of Drivers	Integrated Sensing Systems	Packaging	Accessories
				Accessories (order separately) [22]
CD=0-10V Driver (10%-100% Dimming) **HCD**=0-10V Driver (1%-100% Dimming) **5LTD**=DALI Driver (5%-100% Dimming) **5LTHD**=DALI Driver (1%-100% Dimming) **LV**=Low-voltage System Driver (0%-100% Dimming) [C] **SD**=Step Dimming Driver (50%-100% Dimming) **LH**=Lutron HiLume (LDE1 series) 1%-100% EcoSystem Driver with Soft-on Fade to Black dimming [F] **W2A**=White Tuning, 2 ch, Analog 0-10V Intensity and CCT Control [15] **SR**=Sensor-ready Driver (1%-100% Dimming)	**1**=1 Driver	**[Blank]**=No Sensor **WAA**=WaveLinx PRO Wireless Integrated Sensor [17], [A] **WPN**=WaveLinx PRO Wireless Node without Sensor [17], [A] **WAB**=WaveLinx LITE Wireless Integrated Sensor [18], [B] **WLA**=Low-voltage Integrated Sensor [19], [C]	**U**=Unit Pack **PAL**=Job Pack, out of carton **PALC**=Job Pack, in carton	**CZ2-EQCLIP-U-PK**="CZ2" Earthquake Clip Kit (4 clips per bag kit) [21] **DF-22W-U**=2' x 2' Drywall Frame Kit **SK-22-WS**=2' x 2' Shallow Surface Mount Kit **SK-22-WT**=2' x 2' Tall Surface Mount Kit
Notes (15) White tuning provides correlated color temperatures (CCT) between 3000K (warm) to 5000K (cool) or 2700K (warm) to 6500K (cool). Must be used in conjunction with W2A driver only. Must be used with two (2) 10V dimming control channels, 1 color, 1 intensity. May be combined with Wavelinx sensor control systems only. Integrated options must be used in conjunction with the associated system and may not be compatible with other options or accessories. Please refer to the following: (C) Consult WaveLinx Low-Voltage or DLVP system pages for additional details and compatibility. (F) Consult Marketplace Options - Lutron system pages for additional details and compatibility. Compatible only with driver series shown, and may require two or more drivers. Requires field commissioning to operate or dim. Contact Lutron at www.lutron.com.		**Notes** (16) Matching width lens band on other side of sensor band may be supplied for symmetrical appearance. Required for use with sensor and emergency combination. Add "D" to sensor ordering as shown - WAAD, WABD. (17) WAA sensor and WPN node to be used with CD, HCD or W2A driver. Consult factory for WPN with tunable white W2A driver. (18) WAB sensor to be used with CD or HCD driver. (19) WLA sensor to be used with LV driver. Integrated options must be used in conjunction with the associated system and may not be compatible with other options or accessories. Please refer to the following: (A) Consult WaveLinx PRO system pages for additional details and compatibility. (B) WaveLinx LITE devices are not currently compatible with the WaveLinx Wireless Area Controller. Consult WaveLinx LITE system pages for additional details and compatibility. (C) Consult WaveLinx Low-Voltage or DLVP system pages for additional details and compatibility.		**Notes** (21) An EQ Grid Clip is recommended for all 9/16" ceiling systems. Four required per fixture. (22) Accessories sold separately will be separately analyzed under domestic preference requirements. Consult factory for further information. Integrated options must be used in conjunction with the associated system and may not be compatible with other options or accessories.